

Proceso de jerarquía analítica difusa para la toma de decisiones de suministro eléctrico en áreas rurales no interconectadas en la región caribe colombiana

Trabajo de titulación previo a la obtención del título:

Magister en eficiencia energética y energías renovables

Investigador:

Moreno Rocha Christian Manuel

Facultad de ingeniería

Universidad de la Costa

Tutor:

PhD. Adalberto Ospino Castro.

PhD. Carlos Robles Algarín.

Barranquilla – Colombia 2021

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Declaratoria de responsabilidad

Yo, Christian Manuel Moreno Rocha con documento de identificación N° 1129540983 de Barranquilla - Colombia, autor del trabajo de titulación: titulación “Proceso de jerarquía analítica difusa para la Toma de decisiones de suministro eléctrico en áreas rurales no interconectadas en la Región Caribe Colombiana.” Certifico que el total contenido de este Proyecto de Enfoque Investigativo es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Barranquilla – Colombia 2020

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Agradecimientos

Primeramente, agradezco con todo mi corazón a ti Papito Dios, por permitirme alcanzar una más de tus promesas. A mi mami Judith, a mi esposa y novia de toda la vida gracias por no haberte dado por vencida conmigo y haber estado siempre apoyándome incondicionalmente. Gracias, a mi hijo, porque sin saberlo se convirtió en mi mayor motor e impulso para alcanzar este logro y ya proponerme retos más grandes.

Agradecimiento al ing. Jorge Iván Silva Ortega, quien se ha convertido en un modelo a seguir, agradezco sus consejos, su confianza y sobre todo la fe que me ha regalado, muchas gracias. También agradezco al ing. Adalberto José Ospino Castro y al ing. Carlos Robles por haber aceptado ser mi tutor y cotutor de esta investigación y por la orientación que me han brindado en el desarrollo de esta investigación.

Gracias a la Universidad de la Costa CUC, por confiar en mi como persona y como profesional, a cada uno de los docentes que me dictaron clases en el pregrado y ahora en el postgrado, gracias por brindar y compartir su conocimiento y experiencia, en especial al gran docente Vladimir Sousa Santos.

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Dedicatoria

Al escribir estas palabras se me hace un nudo enorme en la garganta, vienen a mi mente muchos recuerdos de lo difícil que ha sido todo este proceso de formación académica, sin embargo, hoy culmino un proceso más en vida de los muchos que deseo alcanzar, dedico este trabajo investigativo en primera instancia a Papito Dios y mi virgencita María Auxiliadora, por guiarme siempre y no dejarme caer en los momentos que pensé en rendirme y dejar todo tirado. A mi mami Judith Rocha Silvera, quien con su crianza formo el carácter que hoy tengo, al sr Felipe Rodríguez Acuña, quien en los últimos años se ha comportado como una figura paterna y con sus consejos y confianza me ha ayudado a seguir adelante, a mis amigos de clases Jesús y Juan Camilo barrera Hernández, quien en el desarrollo de esta maestría se ha creado una amistad que Dios permita nos traiga a todos grandes recompensas en el ámbito profesional y personal.

Pero sin lugar a duda la mejor de todas las dedicatorias y la más especial es para esa mujer que nunca perdió la fe en mí y me alentó incondicionalmente a quien le debo prácticamente cada uno de mis logros como persona y como profesional, esa mujer que ha estado conmigo en las buenas pero más en las malas, me ha apoyado en cada una de mis ideas y sobre todo, hoy es la madre de mi hijo Christian David Moreno Ortega, quien quiero que vea en mi un modelo a seguir, gracias amor, gracias Cindy Paola Ortega Nuñez, te amo.

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Declaratoria de responsabilidad

Yo; declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación “Proceso de jerarquía analítica difusa para la Toma de decisiones de suministro eléctrico en áreas rurales no interconectadas en la Región Caribe Colombiana.” realizado por el candidato a magister Christian Manuel Moreno Rocha obteniendo el Proyecto de enfoque Investigativo que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad de la Costa CUC.

Barranquilla, Colombia 2020

PhD. Adalberto Ospino Castro

CC: 7144305

PhD. Carlos Robles Algarín

CC: 12448927

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Resumen

En el desarrollo de esta investigación se analiza y estudia la implementación de energías renovables en zonas rurales no interconectadas (ZNI) a la red, principalmente se analizan 6 alternativas o tecnologías que implementan recursos renovables, para la generación de energía eléctrica. Se propone la implementación de una metodología multicriterio (MCDM), que ayude en la mejor selección de sistema de generación de energías renovables en zonas rurales y ZNI, la metodología utilizada es aplicada al uso de energías renovables en espacios rurales y zonas no interconectada a la red, ya que es uno de los métodos más utilizados dentro de un proceso de mejor elección, al igual que para la toma de decisiones energéticas. Se aplica el Proceso Analítico Jerárquico Difuso (FAHP), cuyos datos son obtenidos por medio de una encuesta a un grupo de expertos, con la única finalidad de disminuir cualquier imprecisión por parte del decisor, además este método aplica lógica difusa para eliminar la indiferencia o subjetividad de los juicios entregados por los decisores.

La generación y suministro de energía eléctrica a la población rural con un alto grado de necesidades básicas en los países en desarrollo como lo es Colombia es una tarea compleja que va más allá de la simple selección de la mejor tecnología. Esta investigación explica los resultados logrados mediante el uso de un sistema de apoyo a la decisión de criterios y subcriterios múltiples para ayudar a calcular la fuente de energía más apropiado de opciones de energía para proporcionar suficiente energía para satisfacer las demandas locales que mejoran los medios de vida. La complejidad en la toma de decisiones siempre ha estado presente en el diario vivir de todo ser humano, algunas de las veces causando un conflicto para seleccionar a nuestro juicio la que satisface de mejor forma las necesidades específicas de una situación problema. Es ahí donde deben aplicarse los

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

métodos de decisión multicriterio (MCDM, Multicriterio decision making) estos se emplean cuando el decisor tiene una situación problema de decisión frente a un conjunto de múltiples opciones. La investigación se realiza con entrevistas a diferentes actores, quienes expusieron sus conocimientos sobre la característica de una tecnología en particular.

Para encontrar la mejor solución entre un conjunto de alternativas, se pretende realizar una valoración de las diferentes tecnologías con la ayuda de un grupo de expertos. Para resolver este tipo de problema, el método para valorar debe ofrecer una ventaja sobre otros métodos de decisión multicriterio. Así mismo siempre es recomendable descomponer la situación problema en partes para lograr una mejor comprensión y entendimiento. La presente investigación se dividió en 4 capítulos. En el Capítulo I se presenta una explicación breve acerca de la delimitación de la región caribe, se da a conocer el planteamiento del problema, la justificación de esta investigación, los objetivos y los alcances de esta. En el Capítulo II se encuentra la fundamentación teórica relacionada a las energías renovables se presenta los conceptos básicos relacionados a los métodos de decisión multicriterio (MCDM), así como la metodología difusa planteada. En el Capítulo III se aplica la metodología planteada para el análisis propuesto en este estudio. En el Capítulo IV se presentan los resultados y conclusiones, para finalizar con la bibliografía y los respectivos anexos. Los resultados obtenidos a partir del desarrollo de la metodología FAHP, indican que la energía renovable más atractiva para la zona de estudio de esta investigación es la obtenida por medio de la energía solar fotovoltaica, seguida por la energía eólica y en tercer lugar la de generación por biogás. Demostrando así que los recursos propios que tiene la zona rural del departamento del Atlántico podrían ser utilizados como materia prima para producir energía eléctrica, mejorando sustancialmente la calidad de vida de cada una de las personas de dichas zonas,

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

además reduciendo el uso excesivo de combustibles fósiles y emisiones de gases.

Palabras clave : métodos de decision, Fuzzy, energías renovables, Ahp, números difusos

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Abstract

In the development of this research, the implementation of renewable energies in rural areas not interconnected (ZNI) to the network is analyzed and studied, mainly 6 alternatives or technologies that implement renewable resources for the generation of electric energy are analyzed. The implementation of a multi-criteria methodology (MCDM) is proposed, which helps in the best selection of renewable energy generation system in rural areas and ZNI, the methodology used is applied to the use of renewable energies in rural areas and areas not interconnected to the grid, since it is one of the most used methods within a process of better choice, as well as for energy decision making. The Fuzzy Analytical Fuzzy Hierarchical Process (FAHP) is applied, whose data are obtained by means of a survey to a group of experts, with the only purpose of reducing any imprecision on the part of the decision maker, in addition this method applies fuzzy logic to eliminate the indifference or subjectivity of the judgments delivered by the decision makers.

The generation and supply of electricity to the rural population with a high degree of basic needs in developing countries such as Colombia is a complex task that goes beyond the simple selection of the best technology. This research explains the results achieved by using a decision support system of multiple criteria and sub-criteria to help calculate the most appropriate energy source of energy options to provide sufficient energy to meet local demands that improve livelihoods.

Complexity in decision making has always been present in the daily life of every human being, sometimes causing a conflict in selecting in our judgment the one that best meets the specific needs of a problem situation. This is where multi-criteria decision making (MCDM)

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

methods should be applied when the decision maker has a decision problem situation in front of a set of multiple options. The research is carried out by interviewing different actors, who presented their knowledge about the characteristic of a particular technology.

In order to find the best solution among a set of alternatives, an assessment of the different technologies is made with the help of a group of experts. To solve this type of problem, the valuation method must offer an advantage over other multi-criteria decision methods. It is always advisable to decompose the problem situation into parts to achieve a better understanding and comprehension.

This research was divided into 4 chapters. Chapter I presents a brief explanation about the delimitation of the Caribbean region, the problem statement, the justification of this research, the objectives and the scope of this research. Chapter II contains the theoretical foundation related to renewable energies, the basic concepts related to multi-criteria decision making methods (MCDM), as well as the proposed fuzzy methodology. Chapter III applies the methodology proposed for the analysis proposed in this study. Chapter IV presents the results and conclusions, and ends with the bibliography and the respective annexes. The results obtained from the development of the FAHP methodology indicate that the most attractive renewable energy for the study area of this research is obtained by means of photovoltaic solar energy, followed by wind energy and in third place by biogas generation. Thus demonstrating that the own resources that the rural area of the department of Atlántico has could be used as raw material to produce electric energy, substantially improving the quality of life of each of the people in these areas, in addition to reducing the excessive use of fossil fuels and gas emissions.

Keywords: decision methods, Fuzzy, renewable energy, Ahp, fuzzy numbers

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Contenido

Lista de tablas y figura.....	12
1.1.1 Introduccion.....	15
1.2 Planteamiento del problema y pregunta problema.	18
1.2.1 Planteamiento del problema	18
1.3 Justificación de la investigación.	21
1.4 Objetivos de la investigación.....	24
1.4.1 Objetivo general:	24
1.4.2 Objetivos específicos:.....	24
1.5 Alcance de la investigación.	25
Capítulo 2. Marco teórico	27
2.1 ¿Porque la región caribe?	27
2.2 Situación eléctrica del departamento del Atlántico	27
2.2.1 Situación eléctrica del departamento de Bolívar	28
2.2.2 Situación eléctrica del departamento del Magdalena	29
2.2.3 Situación eléctrica del departamento de Córdoba	30
2.2.4 Situación eléctrica del departamento de la Guajira	31
2.2.5 Situación eléctrica del departamento de Cesar	32

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

2.2.6 Situación eléctrica del departamento de Sucre	33
2.3 Fundamentos teóricos	35
2.3.1 Antecedentes.....	35
2.4 Energías renovables	46
2.4.1 Fundamentos teóricos	46
2.4.2 Biomasa	49
2.4.3 Digestor de biogás	50
2.12.4 Biogás de vertedero.	50
2.4.5 Incineración de residuos	51
2.4.6 Fotovoltaico	51
2.4.7 Colectores solares	53
2.5 Algunas ventajas y desventajas de las energías renovables.	53
2.6 Métodos de decisión multicriterio	57
2.7 Proceso en la toma de decisión.....	57
2.8 Selección de la técnica MCDM	61
2.9 Proceso Analítico Jerárquico (AHP).....	62
2.9.1 Metodología del Proceso Analítico Jerárquico.....	62
Paso 1: Estructurar el problema como una jerarquía.	63
Paso 2: Cálculo de las prioridades entre los criterios	64

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

2.10 Lógica	
Difusa	65
.....	
2.11 Proceso Analítico Jerárquico Difuso (FAHP)	65
2.11.1 Método de análisis extendido AHP con lógica difusa FAHP.....	68
2.11.2 Escala difusa y nomenclatura para adquisición de información	71
2.11.3 Modelación difusa	73
Capítulo 3.	75
3.2 Escogencia de grupo de expertos (encuestadores)	76
3.3 Uso de la metodología FAHP	77
3.4 Planteamiento de alternativas	78
3.5 Planteamiento de Criterios.....	78
3.6 Recolección de juicios para aplicar el método FAHP	83
3.8 Calculo de pesos globales.....	104
Capítulo 4.	105
4.1 Resultados y Conclusiones.....	105
4.1.1 Resultados.....	105
4.1.2 Conclusiones.....	112
4.1.3 Recomendaciones	115
Referencias	117

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Lista de tablas

Tablas

Tabla 1	Uso de las energías renovables en ciudades principales.	46
Tabla 2	Ventajas y desventajas de algunas fuentes de energía renovables.	54
Tabla 3	Aplicación de energías renovables con utilización de métodos MCDM	59
Tabla 4	Escala Fundamental de Comparación Pareada.....	65
Tabla 5	Aplicaciones del método AHP difuso. Elaboración propia.....	66
Tabla 6	Escala difusa triangular. Elaboración propia.....	72
Tabla 7	Matriz de comparación entre criterios.....	86
Tabla 8	Matriz de valores normalizados	86
Tabla 9	Determinación del índice de consistencia y radio de consistencia.....	87
Tabla 10	Jerarquización de los criterios	88
Tabla 11	Jerarquización de los subcriterios económicos.....	89
TABLA 12	Jerarquización de subcriterios ambientales	90
Tabla 13	Jerarquización de subcriterios técnicos.	90
Tabla 14	Jerarquización de subcriterios sociales.....	91
Tabla 15	Jerarquización del subcriterio capital inicial frente a cada alternativa.....	92
Tabla 16	Ponderación de Subcriterios del criterio 1 vs Alternativas.	93
Tabla 17	Ponderación de Subcriterios del criterio 2 vs Alternativas.	94
Tabla 18	Ponderación de Subcriterios del criterio 3 vs Alternativas.	95
Tabla 19	Ponderación de Subcriterios del criterio 4 vs Alternativas.	96

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Tabla 20 Matriz de comparación de criterio 1 y subcriterios.	97
Tabla 21 Matriz de comparación de criterio 2 y subcriterios.	97
Tabla 22 Matriz de comparación de criterio 3 y subcriterios.	98
Tabla 23 Matriz de comparación de criterio 4 y subcriterios.	98
Tabla 24 Matriz de decisión final para el criterio 1.	99
Tabla 25 Matriz de decisión final para el criterio 2.	100
Tabla 26 Matriz de decisión final para el criterio 3.	100
Tabla 27 Matriz de decisión final para el criterio 4.	101
Tabla 28 Puntuación final de cada alternativa.	106
Tabla 29 Matriz final de decisión.	104

Lista de Figuras

Figura

Figura 1 Estadística del servicio eléctrico del Atlántico	29
Figura 2 Estadística del servicio eléctrico de Bolívar	30
Figura 3 Estadística del servicio eléctrico del Magdalena	31
Figura 4 Estadística del servicio eléctrico de Córdoba.....	32
Figura 5 Estadística del servicio eléctrico de la Guajira.	33
Figura 6 Estadística del servicio eléctrico del Cesar.	34
Figura 7 Estadística de quejas presentadas en Sucre.....	35
Figura 8 Etapas en el proceso de toma de decisiones (Fuente: Toskano Hurtado,2000)	
Elaboración propia.....	57
Figura 9 Estructura de jerarquías Analítica (Fuente: García-Cascales & Jiménez, 2009).	
Elaboración propia.....	63

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Figura 10 Intersección entre M_1 y M_2 . Elaboración propia.....	70
Figura 11 Sistema Difuso.	74
Figura 12 Esquema Jerárquico dispuesto para el estudio	77
Figura 13 Ejemplo de encuesta para evaluación de subcriterios por alternativas.	85
Figura 14 Pesos Globales de subcriterios.	102
Figura 15 Jerarquización de alternativas de energías renovables.	108
Figura 16 Jerarquización de criterios.....	109
Figura 17 Resumen general de ponderación de subcriterios.	110

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Introducción.

El mayor reto para la humanidad, al que se enfrenta en la actualidad, es el de conseguir una energía siempre disponible y que esta sea de muy buena calidad y cumpla la expectativa de toda una sociedad, que sea de fácil acceso (Alizadeh, B., & Jadid, S. 2011). El objetivo de accesibilidad se encuentra ligada directamente a la política de precios que se manejen, la disponibilidad está atada a la calidad, pero también a la seguridad y continuidad del suministro eléctrico, y la aceptabilidad esta fundamentalmente vinculada a un conjunto de objetivos medioambientales y a la sensibilidad con la que el público o consumidor y la interacción de esta con el entorno (Napoleón, B., & Julio, C. 2018). Los avances tecnológicos en cada uno de los elementos que se añaden al sector eléctrico para poder ser viables estos deberán ser capaces de responder a cada uno de los objetivos o factores anteriormente mencionados, así mismo deberán ser capaces de responder a las necesidades económicas, ambientales y productivas de los países (Tekiner, H., 2010).

Algunas sociedades parecieran desconocer a ciencia cierta el día en que los recursos energéticos con que cuentan en particular los fósiles y minerales comenzaran a escasearse, pero teniendo presente y realizando proyecciones de cómo ha sido la evolución del consumo hacia el incremento de las economías o países emergentes, se puede suponer e imaginar que la obtención de energía por estas fuentes tradicionales o de origen fósil, resultará insostenible para las futuras generaciones y no tan lejanas, tanto por el agotamiento y no existencia del recurso, pero también por la afectación de este en el medio ambiente (Tekiner, H., 2010)

El aprovechamiento y consumo diario de la energía eléctrica es un servicio vital para el desarrollo y evolución de un país, constituye el principal insumo en la gran mayoría de

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

actividades industriales a nivel mundial, dichas actividades industriales son las que soportan su economía y así mismo la energía eléctrica es el factor indispensable para garantizar la calidad de vida de sus habitantes (Rodríguez Padilla, V. 2016). En Colombia como en otros países latinoamericanos, existe un gran interés por aumentar la cobertura y el suministro de energía, buscando garantizar su aseguramiento a largo tiempo y de una manera sostenible, teniendo presente los estudios realizados de proyecciones en el crecimiento de la población y la industria de años venideros y la escasez prevista en la disponibilidad de los actuales recursos fósiles, como se mencionó anteriormente (Bailly y Consultancy, 2001). En este sentido para poder planear el abastecimiento de los requerimientos energéticos resulta necesario que la planeación energética contemple la inversión en sistemas de generación no convencionales y más si estos pueden ser a base de energías renovables.

Sin embargo, la planeación, evaluación y selección de las alternativas energéticas para una inversión apropiada es una decisión compleja (Herrera-Caro, 2008), antes que nada se debe considerar, que además de satisfacer la demanda proyectada, las plantas de generación de energía eléctrica sea cual sea su fuente, estas deben ser económicas, así mismo deben ser ambiental y socialmente sostenibles y gozar de la aceptación de una sociedad, teniendo en cuenta la importancia que estos criterios y otros más han tomado en los últimos años, es por eso que la presente investigación, está orientada a la solución de toma de decisiones en escenarios energéticos, con el fin de optimizar y priorizar la planeación energética, mediante la selección de alternativas de inversión en la generación de energía eléctrica implementando energías renovables, para así poder satisfacer la demanda de energía prevista a largo plazo. En la presente tesis, se tiene en cuenta el interés actual por invertir en fuentes de energías no

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

convencionales que compitan a su vez con fuentes de energías convencionales o tradicionales, no descartando la opción de sistemas híbridos.

La acción de tomar decisiones es un proceso que está presente en el diario vivir de todos los seres humanos y como el objetivo de esta investigación que permita escoger la mejor alternativa de fuentes de energía, se ha planteado como método para la ayuda de toma de decisión el Proceso Analítico Jerárquico Difuso (FAHP), el propósito es lograr establecer una tecnología que implemente fuentes renovables para la generación de energía a partir del método de decisión multicriterio con aplicación de la lógica difusa, de esta manera se asegura la veracidad y eliminación del grado de subjetividad de los juicios emitidos por los expertos y así establecer los pesos de importancia tanto de los criterios como de las alternativas que se deseen evaluar.

El modelo tiene un factor diferenciador respecto a investigaciones que se han desarrollado en el país en temas de toma decisiones multicriterio en el área de energía y sobre todo en la región caribe colombiana, debido que no se ha implementado la metodología FAHP como método de solución para aproximarse a la mejor solución, teniendo en cuenta diversos criterios cualitativos como los económicos y ambientales y cuantitativos como los técnicos, sociales, ambientales, terrorismo, vías de acceso, etc., lo cual proporciona decisiones más sostenibles. Esta investigación presenta una planeación energética de por lo menos 10 años (aspecto a tener presente por los expertos), considerandos aspectos como los cambios que se puedan presentar en la disponibilidad de los recursos, presupuesto limitado en las inversiones y además cuenta con la participación de expertos en la toma de decisiones, por ultimo constituye una herramienta significativa para aquellas entidades gubernamentales o empresas generadoras

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

de energía, que deseen implementar proyectos de generación, especialmente en áreas con pésimo servicio eléctrico o no tengan acceso a este servicio y deseen aprovechar el potencial de las energías renovables.

Planteamiento del problema y pregunta problema.

Planteamiento del problema

Acorde al proceso de investigación definido para esta tesis de grado, resulta necesario poder transformar la idea inicial en el problema que debe ser resuelto, para ello se requiere de un conocimiento del tema planteado en la idea de investigación, de forma así que permita precisar y poder abordar 3 criterios fundamentales en el desarrollo de una investigación, los cuales son: los objetivos que se persigue en una investigación, las preguntas de la investigación y por último la justificación del porqué del estudio.

Es muy significativo el poder considerar nuevas fuentes de generación, debido que el uso de las renovables compone una alternativa con la que se busca suplir las energías fósiles (Leonard, M. D., Michaelides, E. E., & Michaelides, D. N. 2020). Las energías renovables conjuntamente son una herramienta para mejorar la seguridad energética, contribuyen a aminorar las emisiones de gases de efecto invernadero y suministran beneficios sociales directa e indirectamente: la disminución de los impactos en la salud y el medio ambiente, mejorando el sistema educativo, creación de fuentes de trabajo, el descenso de la pobreza, y aumenta la igualdad de género y, por lo tanto, la reducción de los obstáculos al desarrollo sostenible (Xu, H., Lee, U., & Wang, M. 2020b).

No se debe olvidar que la generación de energía es el origen de mayor producción de gases de efecto invernadero (GEI) en el mundo, según un estudio realizado por el científico

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

(Rodríguez Y.R., en el año 2010). En una convención de la ONU en 1997 se establecieron elementos muy importantes de política mundial para poder mitigar y enfrentar los gases de efecto invernadero y el Cambio Climático. Se estableció que los países en desarrollo necesitarán aumentar su consumo de energía, tomando en cuenta las posibilidades de lograr una mayor eficiencia energética y controlar las emisiones de gases de efecto invernadero, mediante la aplicación de nuevas tecnologías en condiciones que hagan que esa aplicación sea económica y socialmente beneficiosa (Ballester, F., Díaz, J., & Manuel Moreno, J. 2006).

Existe una preocupación por el sistema energético colombiano debido a que se desea encontrar y resolver el problema de lograr satisfacer la demanda nacional a un largo plazo, el poder energizar zonas rurales y zonas apartadas, garantizando un básico y satisfactorio estilo de vida, teniendo presente un escenario de cada vez mayor la escasez de combustibles fósiles, y la proyección de lograr una mayor ampliación en la cobertura para el territorio nacional, esto debido a que aún existen localidades sin acceso a la red nacional o un servicio de calidad las 24 horas del día. Este escenario tiende a colocarse más grave si no se logra eliminar hacer una evaluación e implementación de nuevas alternativas para la generación. Es por eso por lo que esta tesis de grado presenta una investigación que busca resolver el problema mencionado o por lo menos brindar una herramienta de trabajo en la planificación de expansión de generación de energía (Viviana & Castillo, 2019, p. 1133).

(Alizadeh, B., & Jadid, S. 2011), manifiesta que “el problema de planificación de los sistemas de energía es muy importante debido a la creciente necesidad de electricidad y como la planificación requiere grandes inversiones financieras, es esencial tener en cuenta qué alternativas emplear y sus justificaciones económicas”. En la actualidad pareciera que el criterio

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

predominante para resolver este problema solo sea el económico y la decisión se toma con el objetivo de satisfacer la demanda total para un único periodo de tiempo, por otro lado, la información detallada de las alternativas respecto a otros criterios de evaluación tales como los ambientales, sociales, terrorismo, etc. es escasa o simplemente no se tienen presentes (Viviana & Castillo, 2019, p. 1133).

Sólo el enfoque Multi-criteria decision making (MCDM) parece considerar las dimensiones sociales e institucionales, este es insuficiente para analizar la viabilidad en la implementación de las alternativas y determinar la cantidad de energía generada por las diferentes tecnologías en cada período de tiempo (Polatidis y Haralambopolous, 2008), y (Pohekar, 2004). Los autores coinciden, en sugerir la combinación de criterios y métodos de solución, en un método de solución híbrido que involucre el método analítico-objetivo y el método multicriterio o subjetivo.

No se ha conocido la implementación de un modelo matemático y método de solución en la región caribe colombiana, que evalúe las alternativas de inversión en generación de energía, considerando múltiples criterios y subcriterios ya sean cualitativos o cuantitativos, que ayuden a seleccionar la mejor alternativa energética de fuentes renovables considerando las fuentes y las tecnologías viables, la demanda energética, entre otras variables.

Con las consideraciones mencionadas anteriormente se logra identificar elementos de juicio que permitan enunciar el problema de investigación en forma de pregunta:

¿Es de utilidad proponer una técnica de selección que permita a las empresas, administraciones y/o inversor en general, poder identificar y priorizar los criterios y subcriterios que inciden en la selección de un tipo de fuente de energía, de forma que este

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

sea la mejor respuesta, entre las alternativas analizadas, a las previsibles demandas del mercado energético, brindando la posibilidad de una mejora en el bienestar básico a la población de la zona de estudio?

Justificación de la investigación.

Resulta importante comentar que la elección de éste se cimienta en la curiosidad de aplicar un método multicriterio a la elección de un sistema generador de energía eléctrica basado en fuentes renovables para la aplicación en zonas aisladas o zonas no interconectadas. La realidad de la sociedad en que hoy vivimos es que se nos plantean más problemas de los que en verdad podemos llegar a resolver. Tales situaciones problemas podrían asociarse a modo general en sociales, políticos, económicos y medioambientales los cuáles no se encuentran definidos y requieren ser priorizados, es decir, que se indiquen cuales tienen más importancia que otros, con el objetivo de alcanzar compromisos a favor del bien común. Para esta investigación la herramienta utilizada para la toma de decisiones sería el FAHP que facilita la realización de estas tareas.

Durante los últimos años los gobiernos han venido tomando medidas para lograr disminuir la cantidad de efecto invernadero, es así como entre los objetivos del milenio de las Naciones Unidas está: “Frenar el Cambio Climático inducido por el hombre y garantizar energía limpia para todos y dentro de este, frenar las emisiones de gas de invernadero de los entornos energéticos, industriales y agrícolas, y promover energía sostenible para todos”. Consejo de liderazgo de la red de soluciones para el desarrollo sostenible de la (ONU, 2013) y generación de electricidad casi libre de CO₂ para el año 2050 con el uso de energía renovable

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

(esencialmente eólica, solar e hidro-energía) Consejo de liderazgo de la red de soluciones para el desarrollo sostenible de la (ONU, 2013).

De esto resulta importante lograr priorizar que en el sistema de abastecimiento energético nacional se logren tomar medidas o decisiones orientadas a garantizar la cobertura, calidad y sostenibilidad de la energía en todo el territorio nacional. Todos los proyectos que formen parte de la planeación energética deben contemplar nuevos sistemas de generación y fuentes de energía que logren poder propiciar un aseguramiento energético, pero este deberá ser de manera sostenible dada la importancia que ha tomado este tema en los últimos años, considerando la inclusión de las energías renovables y cada uno de los criterios que puedan evaluarse en el impacto ambiental, social, económico, técnicos, etc. Resulta crucial poder contar con un sistema de toma de decisiones de planeación energética que logre contemplar la evaluación de energías renovables además de las convencionales y la inclusión de otros criterios de evaluación aparte del económico.

Según (Battacharyya, 2012), “la necesidad de incorporar aspectos ambientales y sociales en la planificación energética ha incrementado el uso de enfoques multicriterio”. El interés por incursionar en generación de energías no convencionales promovió la utilización de estos métodos de toma de decisiones, debido a que este tipo de energía era menos competitiva que la energía convencional en cuanto a inversión, madurez tecnológica y capacidad de generación. Por lo tanto, los beneficios ambientales, sociales y sostenibilidad a largo plazo hacen pertinente su implementación, y el análisis multicriterio permite identificar las ventajas de esta energía respecto a las otras. De esta manera, se recomienda que las fuentes y tecnologías de generación de energía sean seleccionadas teniendo en cuenta estos criterios.

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

En Colombia es pertinente la planeación de energía a largo plazo y que esta incluya método de optimización multiobjetivo y multicriterio para la selección de alternativas de inversión en generación de energía ya que, de acuerdo con la revisión de literatura, sólo el enfoque de optimización multicriterio permite considerar las dimensiones sociales, institucionales y de sostenibilidad, es decir, los criterios cualitativos los cuales se consideran en esta tesis de grado.

Existen localizaciones a nivel local, regional, nacional e internacional, donde necesitan de un sistema aislado para la producción de electricidad, estas instalaciones aisladas son apropiadas en regiones donde la conexión a la red eléctrica no es posible o no está prevista debido a los altos costos de ampliación de la línea eléctrica, especialmente en las zonas rurales remotas. Por esta razón se realizó un análisis de las distintas alternativas de energías renovables expuestas en esta investigación respondería mejor a las necesidades de demanda de una zona concreta, comparando una serie de criterios, subcriterios y alternativas basadas en energías renovables, fomentando así su utilización con el objetivo de obtener una energía limpia y cooperante con el medioambiente.

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Objetivos de la investigación.

Objetivo general:

Evaluar soluciones energéticas, en zonas rurales no interconectadas de la región caribe, aplicando el proceso de jerarquía analítica difusa (FAHP), para la toma de la mejor decisión.

Objetivos específicos:

- Definir los criterios y subcriterios técnicos, económicos, ambientales y sociales a utilizar en el proceso de toma de decisión, para la electrificación en zonas aisladas o zonas no interconectadas.
- Aplicar la metodología FAHP que permita comparar, ponderar y jerarquizar los criterios y subcriterios seleccionados para priorizar alternativas de suministro de energía renovables en zonas no interconectadas
- Analizar los resultados obtenidos con la aplicación de la metodología FAHP y estructura jerárquica obtenida, que coadyuve al proceso de la toma de decisiones para definir la mejor solución y alternativa debida.

Alcance de la investigación.

El objetivo inicial de esta investigación la cual tiene como línea de estudio la aplicación de la lógica difusa en la implementación de las energías renovables es poder acceder a un acercamiento, poco definido a la posibilidad de lograr una solución a un problema que percibamos en nuestro entorno nacional o internacional. Además, la presente investigación se ha desarrollado en un periodo de tiempo comprendido desde el mes de mayo del 2019 a finales del 2020. Esto ocasiona un análisis que permita estructurar una idea inicial, definir un contexto

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

y todos los elementos que componen el problema. La investigación es realizada por el estudiante de postgrado Christian Manuel Moreno Rocha en su maestría en de eficiencia energética y energías renovables, además cuenta con la formación profesional en Físico puro de la Universidad del Atlántico e ingeniero eléctrico de la Universidad de la Costa.

Los alcances que se desean lograr con esta investigación, principalmente el obtener una fuente de energía renovable que sea acorde a cada uno de los criterios y subcriterios que se establezcan para la zona de estudio, región caribe colombiana, por otro lado se desea obtener una ponderación y una jerarquización de criterios, subcriterios y fuentes de energía utilizando la metodología FAHP, la cual ofrece como ventaja frente a la AHP que esta logra mitigar el grado de subjetividad que cada experto que se consulte puede dar a los datos emitidos.

De obtener estos alcances, esta situación genera un mayor compromiso y competitividad entre las empresas generadores de energía eléctrica obtenida de la transformación de las energías renovables, trayendo como consecuencia la necesidad de una reducción de los costos de producción y por ende la energía que se consuman.

¿Como plantear y resolver un modelo de solución para el problema de planeación energética a largo plazo, que facilite la escogencia de una fuente de energía y que esta sea fiable para la energización de zonas apartadas, zonas rurales y/o zonas que a la fecha de hoy están no interconectadas, que incluya recursos renovables, involucre múltiples criterios, subcriterios y métodos de solución cuantitativos y cualitativos conjuntamente?

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Capítulo 2.

Marco teórico



¿Porque la región caribe?

Un diagnóstico elaborado por la Superintendencia de Servicios Públicos en el 2016 señala que en la región Caribe colombiana se encuentran los departamentos que presentan el mayor número de interrupciones en el país y tiempo de desconexión.

Situación eléctrica del departamento del Atlántico

En la región caribe colombiana por mal servicio de energía, Electricaribe recibió aproximadamente 75.140 peticiones, quejas y reclamos durante el cuarto trimestre de 2015, donde el 61% de las mismas estaba concentrado en Barranquilla (Elheraldo.Co, 2016).

El departamento del Atlántico es uno de los departamentos para los que se esperan mayores inversiones orientadas a mejorar la prestación del servicio con proyectos contemplados en el Plan5Caribe, con la puesta en marcha de proyectos regionales y locales, pero la gran mayoría de estos proyectos están focalizados en Barranquilla y su área metropolitana. Se identificaron zonas como el suroccidente de la ciudad y municipios como Piojó, Galapa, Tubará, Luruaco y Candelaria, y otros donde se presentan mayor número de interrupciones en frecuencia y horas como se observa en la Figura 1 (Superintendencia de Servicios Públicos, 2016).

-  = duración sin el servicio por usuarios (horas/año)
-  = número de salidas por usuarios.

Atlántico

Top 10 municipios con mala calidad 2015

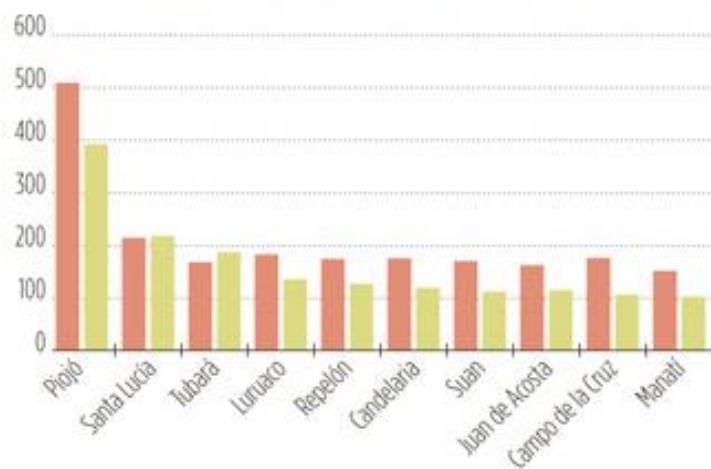


Figura 1 Estadística del servicio eléctrico del Atlántico

Situación eléctrica del departamento de Bolívar

En el departamento de Bolívar se presentaron un aproximado de 19.700 peticiones, quejas y reclamos durante el cuarto trimestre de 2015 del cual el 68% provino de Cartagena (Superintendencia de Servicios Públicos, 2016). En este departamento las mayores inversiones se encuentran concentradas en el norte y centro del departamento, se logra evidenciar que las poblaciones que registran más horas y frecuencia de interrupciones están en la zona sur. Entre las zonas que pasaron más horas sin el servicio en Bolívar durante el año pasado estuvieron los municipios de Barranco de loba, Guamal, Mompos, y Arjona, entre otros y en Cartagena: Barú y la Zona Suroridental de la ciudad ver Figura 2 (barrios aledaños a la Avenida Pedro de Heredia en dirección al municipio de Turbaco) (Elheraldo.Co, 2016).

Bolívar

Top 10 municipios con mala calidad 2015

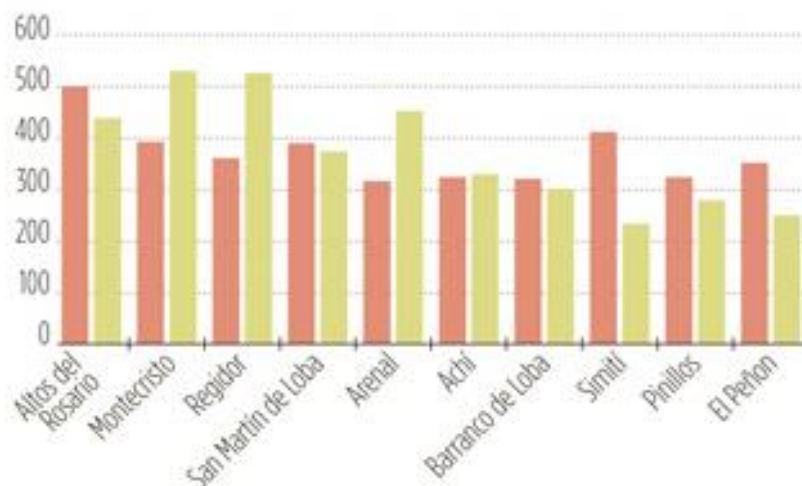


Figura 2 Estadística del servicio eléctrico de Bolívar

Situación eléctrica del departamento del Magdalena

En el departamento del Magdalena los usuarios del servicio de energía eléctrica presentaron un aproximado de 23.972 peticiones, quejas y reclamos y 67% estuvo concentrado en Santa Marta (Superintendencia de Servicios Públicos, 2016), es el tercer departamento después del Cesar con más PQR. Este departamento tanto el mayor número de horas como la mayor cantidad de interrupciones del servicio se presentaron en la zona del municipio de Ciénega hasta Fundación abarcando las poblaciones: Riofrio, Santa Rosalía, Guacamayal, Manzanares, Tucurinda y Aracataca, en esta zona se instaló en el 2017 un transformador de 60MVA y tres circuitos en la subestación Ciénega ver Figura 3, dos en subestación Bonda, la cual además será repotenciada.

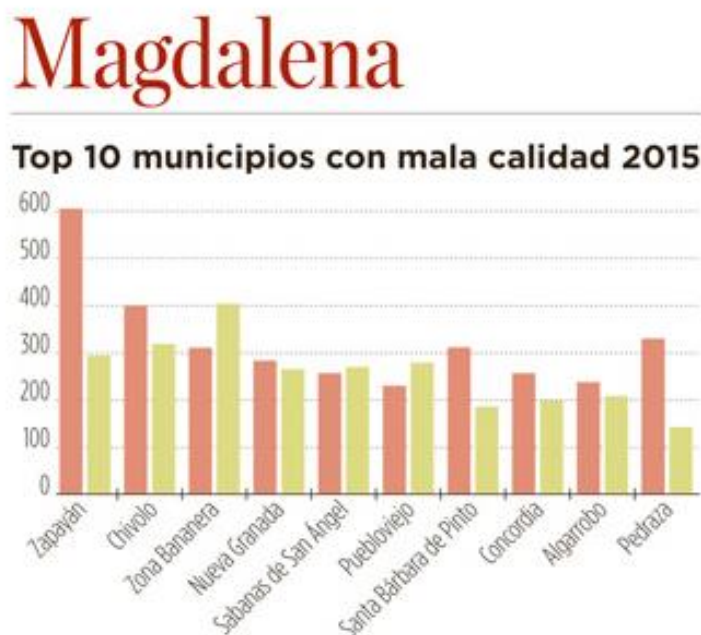


Figura 3 Estadística del servicio eléctrico del Magdalena

Situación eléctrica del departamento de Córdoba

Acorde con lo mostrado por la Superservicios el caso del departamento de Córdoba es el más crítico de la región, pues presenta los rangos más altos en la duración y frecuencia de las interrupciones, sin embargo, no es el departamento con el mayor número de quejas, en el último trimestre de 2015, las quejas que presentaron los usuarios de Electricaribe sumaron aproximadamente 18.291 y el 37% se concentró en Montería, según cifras dadas por la empresa prestado del servicio, ver Figura 4.

Datos señalan que la frecuencia presentó un promedio diario entre 1 más de 5 salidas por día y con una duración mínima de 10 minutos por día. La entidad calcula que “el número de personas afectadas por este mal servicio es de 1.7 millones y representa cerca del 3,5% de la

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

población del país”. Hay inversiones contempladas tanto locales como regionales en el centro y norte del departamento (Elheraldo.Co, 2016).

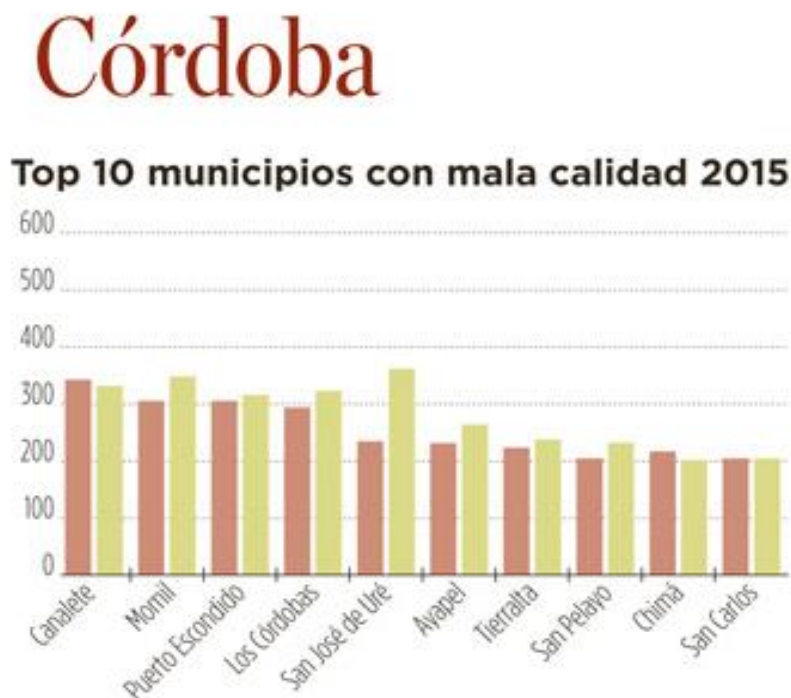


Figura 4 Estadística del servicio eléctrico de Córdoba

Situación eléctrica del departamento de la Guajira

Las peticiones, quejas y reclamos que presentaron los usuarios de Electricaribe en La Guajira, en el cuarto trimestre del 2015 fueron aproximadamente 15.482 y Riohacha concentró el 46% de las mismas. En la zona de este departamento que es atendida por Electricaribe, las poblaciones que presentaron interrupciones por más horas al mes son Manaure, Shiruri y Uribia, Pelechua, Campana y Camarones, Tomarrazón y Barbacoas, Albania (Carraipia y Sosumana, Fonseca, Jagua del Pilar y El Jaro, ver Figura 5. Se espera que con el Plan5Caribe se contemplen proyectos como la instalación dos transformadores 220/110 kV de 100 y 40 MVA

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

en la Subestación Cuestecitas en Albania y dos compensaciones capacitivas a 110 kV de 15 MVar, cada una en las subestaciones Riohacha y Maicao.

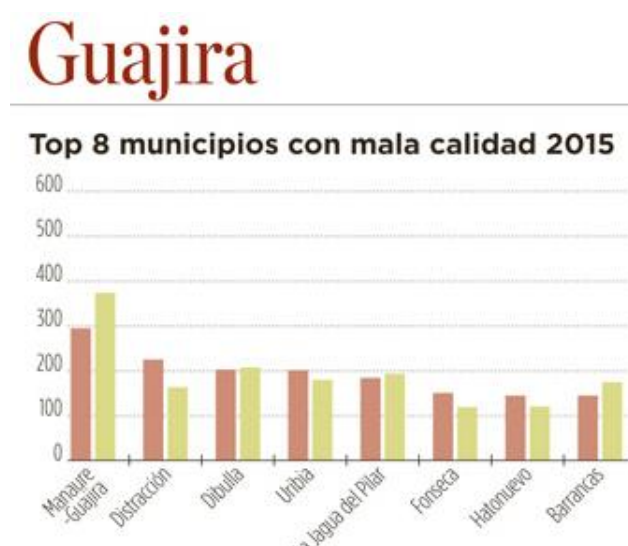


Figura 5 Estadística del servicio eléctrico de la Guajira.

Situación eléctrica del departamento de Cesar

Para este departamento se presentaron un aproximado de 33.144 peticiones, quejas y reclamos a Electricaribe durante el último trimestre de 2015 y el 76% estuvo concentrado en Valledupar. Algunos municipios presentaron las condiciones más críticas de calidad en la prestación del servicio eléctrico, tales como, Mundo nuevo, La Esmeralda, Soledad, Arjona, La Compañía, Chimichagua, Telecom, Montecarlo, El Guamo, La Candelaria al igual que Tamaleque, Pailitas y Curumani entre otros (Heraldo, 2016). El Plan5Caribe tiene en Cesar varios proyectos entre los que se destaca la subestación La Loma a 110 mil voltios, ver Figura 6, y líneas de transmisión asociadas, en el corregimiento La Loma del municipio de El Paso (Elheraldo.Co, 2016).

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

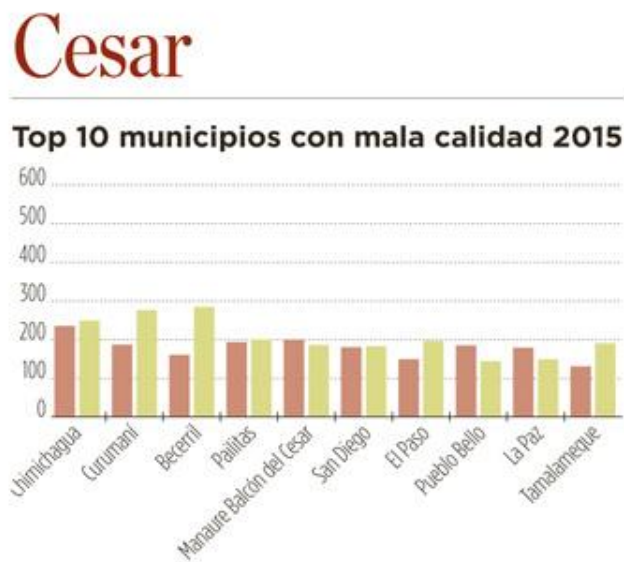


Figura 6 Estadística del servicio eléctrico del Cesar.

Situación eléctrica del departamento de Sucre

Para este departamento se registraron 14.259 peticiones, quejas y reclamos, entre octubre y noviembre durante el año 2015, el 55% de las quejas que se presentaron corresponde a Sincelejo. Las poblaciones que presentaron las mayores interrupciones en número de horas y frecuencia fueron Tolú, ver Figura 7, Coveñas, Palmitos, Toluviejo, Macaján la igual que el norte que abarca áreas urbanas y rurales de los municipios: El Cariño, Berrugas, el Higueron, Las Vueltas, Rincón, San Onofre, Pajonal, Libertad, Cerro dos Casas, Sabana Mucacal, Labarce y San Antonio (Heraldo, 2016). Las inversiones en el mejoramiento están concentradas en el centro del departamento (Elheraldo.Co, 2016).



Figura 7 Estadística de quejas presentadas en Sucre.

Fundamentos teóricos.

Antecedentes

Estudiar los problemas de planeación del abastecimiento energético a largo plazo es un tema que día a día viene tomando cada vez más importancia por los gobiernos y las industrias en general, esto se ha tornado un tema bastante relevante, la gran causa de esta repentina importancia se debe al aumento significativo de la demanda energética a nivel mundial y el panorama de escasez en combustibles fósiles además de las constantes fluctuaciones en el valor de estas fuentes, se destaca también el aumento por la preocupación de cada vez más controlar las emisiones de gases de efecto invernadero. Se considera a nivel mundial el poder lograr una matriz energética que este orientada en la energía sostenible.

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Algunos autores señalan que: “poder determinar o establecer o no sistemas de energías renovables y que fuentes convencionales o no convencionales es la mejor opción, resulta ser una decisión compleja” lo cual origina la dificultad en lograr una expansión de la capacidad de generación. (Tekiner, H, 2010) señala que “el problema de planificación de expansión de la generación consiste en la selección de opciones tecnológicas de última generación que se añaden a un sistema existente, teniendo en cuenta, cuando y donde se deben construir para satisfacer la creciente demanda de energía en un horizonte de planificación”.

Este problema es conocido por sus siglas en inglés como PGEP (Power Generation Expansion Planning), consiste en la apreciación de diferentes alternativas de proyectos de generación de energía para seleccionar la mejor y es definido por (Meza, J. L. C et al., 2007 y 2009), como el problema es poder lograr determinar qué, dónde y cuándo construir nuevas unidades bases de generación, para así poder satisfacer la demanda de energía prevista y determinando la capacidad de generación que se debe instalar y lo más importante la cantidad de energía a generar en períodos de tiempo oportunos, todo esto para poder lograr hacerlo dentro de una planeación a largo plazo.

Lo que se busca encontrar es un modelo que permita encontrar una escogencia de la mejor alternativa que también permita la futura expansión al mínimo costo, pero también hay otros objetivos o también llamados criterios de selección que pueden ser considerados tales como; el impacto ambiental, la fiabilidad, cantidad de combustible, terrorismo, entre otros. Esto puede lograrse utilizando optimización, pero es considerado algo complejo y difícil de resolver especialmente cuando involucra múltiples objetivos o múltiples criterios, como por ejemplo maximización de la confiabilidad, minimización de los impactos ambientales, etc.

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

De acuerdo con (Jebaraj S. 2006) los planteamientos de los modelos en cuanto a criterios, fuentes y tecnologías a evaluar y métodos de solución de los problemas de decisión mencionados, son variados y su desarrollo ha venido evolucionado en los últimos años gracias a diversas investigaciones en diferentes áreas de estudio. “Existen aplicaciones en diferentes tipos de modelos tales como modelos de energía renovable, reducción de emisiones, planeación energética, abastecimiento de la demanda energética, y modelos de pronóstico control empleando métodos de optimización”

Anteriormente para hacer la formulación y lograr seleccionar la mejor alternativa y resolver una situación de tipo GEP inicialmente era tratado como un modelo mono-objetivo, y siempre prevalecía el criterio económico concerniente con la minimización de diferentes tipos de costos, como, por ejemplo: costos de inversión, de operación (generación y transmisión) y mantenimiento. Uno de los primeros autores como, (Bloom, J. A. 1982) abordó esta situación, vista ahora a largo plazo y lo resolvió con un bosquejo mono-objetivo (minimizar los costos: valor presente de los costos de inversión y operación del sistema), considerando evaluación multiperíodo y diferentes tipos de plantas de generación. Logro manipular el método de Descomposición de Benders Generalizada (Geoffrion, AM., 1972) y dividió el problema en un problema máster y un subproblema bajo el supuesto de linealidad.

Durante los últimos años y según (Bhattacharyya, 2012), transmitida “la necesidad de incorporar aspectos ambientales y sociales en la planificación energética, la preocupación y el interés de los países al igual que las industrias por incursionar en generación de energías no convencionales y debido a que este tipo de energía era menos competitiva que la energía convencional en cuanto a inversión, madurez tecnológica y capacidad de generación” dio

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

origen a la necesidad de incorporar más de un objetivo o más de un criterio según sea el caso de la situación de estudio, pasando del económico, a los técnicos y luego a los ambientales (los cuáles se hicieron importantes y visibles debido al tratado de Kyoto en 1992), esto marco una pauta a la hora de tomar decisiones utilizando esta metodología, donde el factor o criterio predominante durante mucho tiempo fue el económico, con este cambio se garantizó un abastecimiento energético confiable y que minimice el impacto ambiental. En la actualidad los problemas de toma de decisiones involucran adicionalmente el criterio social (Doukas, H. C. et, 2007) e indicadores de sostenibilidad (Afgan, N., 2008). Esta tendencia ha ocasionado el incremento notable el uso de enfoques multicriterio en la solución del problema de decisión.

Los métodos de toma de decisión multicriterio por sus siglas en ingles MCDM se dividen en dos: 1. Métodos de toma de decisiones multiobjetivo denominados (MODM) y los métodos de toma de decisiones con múltiples atributos denominados (MADM) (Theodorou, 2010).

En estudios realizados por (Theodorou, 2010): muchos métodos de toma de decisiones con múltiples criterios se ejecutan a lo largo de los años y son utilizados para encontrar a una gran variedad de problemas. Estos métodos varían desde los muy simples hasta muy complejos. Algunos tales como el método de las sumas ponderadas (WSM, por sus siglas en inglés Weighted Sum Method), (Zadeh, 1963) y el método del producto ponderado (WPM, por sus siglas en inglés (Weighted Product Method) son métodos muy comunes (Cherni et al., 2007).

Otros métodos y técnicas han sido desarrollados como una alternativa, como la técnica simple de calificación para atributos múltiples (SMART, por sus siglas en inglés Simple Multi-

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

attribute Ranking Technique), Olson (1996), Mészáros y Rapsák (1996) como una versión más simple de la teoría de la utilidad de atributos múltiples (MAUT, por sus siglas en inglés Multi-Attribute Utility Theory), Keeney y Raiffa (1976) y la técnica para orden de preferencia por similitud para la solución ideal (TOPSIS, por sus siglas en inglés Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), (Hwang and Yoon, 1981), como un alternativa al método de eliminación y selección traduciendo la realidad (ELECTREE Elimination and Choice Translating Reality), (Roy B.,1985), entre otros.

Recientes trabajos de investigación han implementado los métodos Fuzzy AHP (FAHP) y GIS (por sus siglas en inglés, Geographic Information System) (Marques, J.E., 2015) y (Eroglu, Hasan and Aydin Musa, 2015) y SMAA (por sus siglas en inglés, Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis) (Wang, Haichao., 2015) para resolver problemas de decisión multicriterio.

Los métodos de MCDM más usados y recomendados para la planificación energética, en especial de la energía renovable son: el AHP Analytic Hierarchy Process, propuesto por (Saaty, 1980), seguido por PROMETHEE, ELECTREE en sus diferentes versiones y MAUT. (Pohekar, 2004), (Theodorou, 2010) y (Bhattacharyya, S. C.,2012) y (Wang, 2009) indican que el método AHP es el método de solución integral más popular. Y según (Karni., 1992), con el fin de validar el resultado se puede usar más de un método MCDM para resolver el problema de decisión.

Para los años noventa, más precisamente en el año 1999, (Linares Llamas, P, 1999) plantea una posible solución al problema de planificación de recursos para lograr satisfacer toda la demanda en un horizonte de planeación a largo plazo en España. A discrepancia de las

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

investigaciones anteriores, incluye una fase adicional en la metodología de solución: tratamiento de incertidumbre. La solución se desarrolla en tres fases: optimización multiobjetivo con programación compromiso para determinar el conjunto de soluciones eficientes, optimización multicriterio: AHP y manejo de incertidumbre: por medio de escenarios y resolución de un juego contra la naturaleza involucrando análisis de riesgos.

Para los años 2004 (C. Henggeler Antunes, 2004) plantea el método conocido como PGEP el cual consistió en un método de solución de problemas multiobjetivo, utilizando una programación lineal entera y mixta, arrojando como resultado un conjunto de soluciones no dominadas y de las cuales se obtendría la solución al problema en cuestión, en este mismo periodo de tiempo para ya un poco más adelante específicamente para el año 2007 (Meza, J. L. y C. Henggeler Antunes, 2007) diseñan el enfoque híbrido para resolver el problema de decisión de planeación de la expansión de generación de energía en dos fases: Fase 1: se le da el nombre Programación Lineal Multiobjetivo y Fase 2: En donde se prioriza la implementación de las alternativas de inversión con cada una de las tecnologías para un período de tiempo, con el método AHP. Como unión y conclusión de ambas etapas o fases se determina que sería interesante incluir más objetivos en problema como un mejor impacto social para maximizar la confiabilidad del sistema y técnica de decisión.

Además, existen otras aplicaciones y métodos de solución del problema, pero las mayores limitantes para la solución MGEP son tiempo y costo. Por otro lado, señala que la disponibilidad y experiencia de los tomadores de decisiones son un aspecto clave en este tipo de aplicaciones.

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Por su parte en el año 2006, (Ehrgott, 2006) rotula que el método de las restricciones es el método más notorio y fácil de usar para encontrar todas las soluciones eficientes, y que el método de las restricciones elásticas es superior al método de las restricciones, ya que genera soluciones eficientes aceptables y requiere menor esfuerzo computacional (Kazemi, A., 2001), en el 2014 se aplican a los problemas de planeación de expansión en generación y transmisión optimización multiobjetivo usando la teoría de la decisión de la brecha “gap” de información y el método ϵ de (Panpan, J, 2014). En el año 2013 se muestra un nuevo enfoque para sistemas híbridos de generación renovable distribuida basado en el grado de satisfacción difusa fuzzy combinado con un algoritmo para lograr la optimización del sistema.

(Ameli, A., 2015) soluciona un problema con optimización multiobjetivo con enjambre de partículas (MOPSO por sus siglas en inglés, multiobjective particle swarm optimization) y técnicas de optimización difusa fuzzy, la decisión incluye localización. Por otro lado, (Hatice Tekiner, 2010) resolvió el problema de multiperíodo y multiobjetivo GEP con simulación Montecarlo, para controlar la incertidumbre y determina la capacidad y el período de tiempo donde debe ubicarse la nueva unidad base de generación. El problema fue formulado con programación lineal mixta entera MILP, donde se llegó a la formulación de un Pareto, y las soluciones óptimas son encontradas a partir de escenarios de simulación con combinación de las funciones objetivo y programación estocástica.

La presente tesis de grado propone resolver un problema de selección de la mejor energía renovable para uso en la región caribe colombiana específicamente, empleando un método multicriterio como es el FAHP, como aporte significativo a la planeación energética de un país especialmente la región caribe (Robles-Algarín et al., 2018). En Colombia, se han

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

colocado en marchas investigaciones similares a la propuesta, encaminadas a seleccionar las mejores alternativas de generación de energía, con el objeto de resolver el problema de energización, particularmente en ZNI y el Ministerio de Minas y Energía, ha venido trabajando en la solución de este problema.

En 1999, la Unidad de Planeación Minero Energética, (UPME), contrato el diseño de un plan estructural, institucional y financiero para el suministro de energía eléctrica a las ZNI del territorio nacional, con la colaboración de las comunidades y el sector privado con previa caracterización de la demanda de energía, priorización en la clasificación de los centros poblados, su situación natural, económica y social, así como una estimación de los costos del suministro de energía, un sistema de información geo-referenciado de las ZNI y una propuesta regulatoria de suministro de electricidad (Hagler Bailly y Aene Consultancy, 2001).

Por su parte, (Tobón D.,2010) señala que, en Colombia, la energización de las ZNI en el pasado se abordó desde la factibilidad técnica y la viabilidad económica de los proyectos nada más, sin tener presente otros criterios de evaluación que a la luz de hoy resultan muy importante. Sin embargo, este esquema tradicional es modificado por investigaciones como las de (Cadena, A, 2005), (Henao, 2005), (Pérez, E 2000), estas investigaciones contemplan múltiples objetivos o criterios como: naturales, sociales, humanos, biofísicos y financieros lo cual ahora constituyen una propuesta integral en la selección de tecnologías y la asignación de recursos a proyectos de energización en el territorio nacional.

Otras investigaciones han utilizado la metodología de medios de vida sostenibles MVS, para resolver el problema de energización en sus zonas de estudio, tales como (Gonzales, 2005) propone en su investigación un modelo para la selección de proyectos que busca maximizar el

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

beneficio de la localidad de Calamar, Guaviare. Para el año 2017 (Hoyos, 2017) en la evaluación de políticas para la electrificación de una ZNI en el suroccidente de Colombia.

Ese mismo año (Cherni, 2017), presentan una herramienta analítica designada como “The Sustainable Rural Energy Decision Suport System-DSS” (SURE), con el objetivo de maximizar los cinco criterios principales que representan una localidad (físico, financiero, natural, social y humano), cuyas variaciones dependen principalmente de la provisión de energía eléctrica y de otros proyectos productivos y sociales complementarios, para el análisis de decisión de alternativas de generación de energía rural y suministro de energía renovable, usando el enfoque MCDM. Trabajos análogos han sido desarrollados en Colombia por (Naranjo, 2005) y (Franco, 2008).

(Tobón D, 2010) plantea una solución a un problema multiobjetivo e intenta plasmar la característica básica de esta propuesta, la cual consiste en que todas las variables se reducen a una dimensión de costos, es decir, cualquier variable o criterio se cuantifica monetariamente. Lo que se realizó fue una comparación de las alternativas en términos del valor presente neto y se estudió la rentabilidad de establecer proyectos en pro de la reducción de emisiones de CO₂ (Şengül et al., 2015).

El modelo crea una idea de qué las opciones en cuanto a tecnología y tamaño son más eficientes en términos de mínimo costo y sostenibilidad además compara las alternativas de generación propia con interconexión al Sistema Interconectado Nacional. Por otro lado, en la ciudad de Medellín, el Instituto de Energía de la Universidad Nacional de Colombia ha desarrollado herramientas de planeación y metodologías para la energización rural, para ello

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

estudia varios objetivos y algoritmos genéticos (Smith y Mesa, 1996) y (Smith y Pulgarín, 2002). Mientras que, (Bastidas, M, 2010),

desarrolló un modelo de optimización termo-económica, tecnológica y ambiental utilizando algoritmos conocidos como genéticos multiobjetivo, con los siguientes objetivos: minimización de gases efecto invernadero, minimización de costos energético-económicos y maximización de la eficiencia energética. Se realizó tratamiento de la incertidumbre empleando simulación Montecarlo.

Estas investigaciones tanto a nivel nacional como internacional ayudan a asentar un importante precedente para próximas investigaciones en lo que se refiere a la planificación energética de Colombia y más a lo que esta tesis de grado está centrada en la planificación energética de la región caribe colombiana en especial el departamento del Atlántico.

Con la información anteriormente estudiada se puede concluir, que emplear métodos MCDA e incorporar dos o más métodos MCDA con estilos diferentes en la solución del problema, estos logran otorgar mayor validez en la solución, los expertos en estas temáticas recomiendan una herramienta híbrida es decir que combine dos o más opciones para lograr así resolver el problema de decisión y de esta manera tomar ventaja de las fortalezas y debilidades de las diferentes opciones y la verificación en los resultados de los enfoques estipulados.

Se puede concluir que la optimización por multicriterio también conocida como MCDA para selección de alternativas de inversión en generación de energía, ayuda a resolver de manera correcta y optima el problema de decisión, en planeación de la expansión de capacidad en generación de energía y distribución correcta a lo largo del territorio nacional, teniendo como base la principal fuente de energía en cada localidad. La ejecución en grandes o

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

pequeños proyectos e investigaciones aplicando métodos multiobjetivo, permite solucionar el problema, considerando las características energéticas del sistema, tales como la zona de instalación, la población a beneficiar, el tiempo de generación, etc. y la generación a futuros periodos en un horizonte de planeación a largo plazo.

Por lo tanto, el lograr la implementación de métodos multiobjetivo y multicriterio conjuntamente logra una solución integral que involucra las soluciones obtenidas a partir de un tratamiento objetivo y analítico, con el tratamiento subjetivo que pueden realizar los comentarios o encuestas de los expertos, alcanzando la decisión apropiada, que no está condicionada únicamente por la experiencia y percepción individual del grupo de expertos, lo que conduce a una solución más robusta y acertada.

Centrándose un poco más a lo que se refiere a la utilización de estos métodos en nuestro país, es importante decir que la implementación del método de solución combinado tal como multiobjetivo y multicriterio, para aproximarse a mejores soluciones, debe profundizarse aún más y sobre todo en aquellas zonas de potencial energético como es el caso de la región caribe y el departamento del Atlántico, ya que pocas aplicaciones integran el método de optimización multiobjetivo, seguido de métodos de optimización multicriterio para resolver el problema de planeación energética en nuestro territorio, pocas investigaciones desarrolladas en nuestro país incorporan criterios sociales y/o de sostenibilidad en la toma de decisiones, para la evaluación de alternativas de energía convencional y renovables y resuelven el problema en diferentes nodos conjuntamente, como lo propone la presente investigación. Además, a diferencia de investigaciones preliminares, la propuesta evalúa en el método multicriterio aplicando FAHP.

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Energías renovables

Fundamentos teóricos

Entiéndase como energía renovable a todo aquel tipo de energía obtenida por algún recurso que se da y origina de manera natural, se considera inagotable o que se puede volver a regenerar de manera natural. Estas energías no generan contaminantes en comparación a las convencionales que puedan incidir de forma negativa al desarrollo y sostenibilidad del medio ambiente. (Torres, 2008)

El objetivo de estas tecnologías es ser utilizadas en ambientes rurales o urbanos donde no se cuente con un servicio eléctrico o este sea de mala calidad, además se busca reducir el consumo de energía proveniente de fuentes convencionales que tengan gran impacto sobre el medio ambiente o la sostenibilidad de este. Es necesario analizar los tipos de energías que se puedan integrar a la red eléctrica ya existente pero además saber aprovechar los recursos según la disponibilidad local. A continuación, en la Tabla 1, se muestra una breve reseña de algunas ciudades donde se han implementados proyectos importantes de instalación y puesta en marcha de energías con fuentes renovables.

Tabla 1 Uso de las energías renovables en ciudades principales.

Energías	Ubicación	Descripción	Referencia
Renovables			
s			

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

<u>Biomasa</u>	Beijing capital de China.	Presenta un estudio sobre el modelado del sistema energético hacia la energía renovable y el desarrollo de bajo carbono para la ciudad de Beijing.	(Zhao, Guerrero, Jiang, & Chen, 2017)
	Mertesdorf ciudad de Alemania.	Tiene como objetivo comprender en qué medida la planta MBT-MARSS es ambientalmente sana, investigando costos y beneficios ambientales de reemplazar el vertedero y la eliminación de residuos a energía, por medio de la separación de biomasa para la generación de energía y otras fracciones recuperables (metales, plástico).	(Ripa, Fiorentino, Giani, Clausen, & Ulgiati, 2017)
<u>Fotovoltaica</u>	Ludwigsburg en el suroeste de Alemania.	El objetivo de este trabajo es determinar el potencial fotovoltaico solar a escala	(Romero Rodríguez, Duminil,

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

		urbana y regional, utilizando descripciones de la geometría de cada edificio.	Sánchez Ramos, & Eicker, 2017)
<u>Parques Eólicos</u>	Ibrahimyya, ciudad de Jordania	Permite monitorear el rendimiento de la turbina, el dimensionamiento del parque eólico y todo el sistema, lo que afecta significativamente la energía extraída por año de los aerogeneradores.	(Al-Masri & Ehsani, 2016)
<u>Mareomotriz</u>	Bretaña, ciudad de Francia	Produce energía como para abastecer a 225.000 habitantes, con 24 turbinas tipo bulbo de 10 MW cada una.	(Structuralia, 2016)
<u>Hidráulica</u>	Hamburgo, Ciudad Portuaria.	Más de 300 empresas de la ciudad de Hamburgo se dedican constantemente a trabajar en varias energías renovables, de entre ellas la	(Zapf, 2011)

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

hidráulica.

Elaboración propia.

Biomasa

La biomasa es una fuente de energía originaria de manera indirecta del sol y puede ser estimada una energía renovable siempre que se sigan unos parámetros medioambientales convenientes en su uso y explotación.

La biomasa se forma a partir de la energía solar por medio del proceso denominado fotosíntesis vegetal. Mediante la fotosíntesis las plantas que contienen clorofila, convierten el dióxido de carbono y el agua, productos minerales sin valor energético, en materiales orgánicos con alto contenido energético y a su vez sirven de alimento a otros seres vivos.

Si los materiales orgánicos resultantes han sido obtenidos a partir de la fotosíntesis o bien son resultado de una cadena biológica se pueden distinguir dos tipos de biomasa:

Biomasa vegetal: Resultado directo de la actividad fotosintética de los vegetales.

Biomasa animal: Se obtiene a través de la cadena biológica de los seres vivos que se alimentan de la biomasa vegetal.

Las biomásas vegetales y animales producidas no son utilizadas por el hombre en su totalidad lo que conlleva la generación de residuos sobrantes de la misma. También se expulsa a la naturaleza gran parte de la biomasa utilizada. El conjunto de los residuos orgánicos de producción o consumo de la biomasa reciben el nombre de biomasa residual, también aprovechada en la obtención de energía. Estos residuos de biomasa fosilizados a lo largo del

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

tiempo constituyen la biomasa fósil, concepto que engloba a los denominados combustibles fósiles que actualmente conocemos, carbón, petróleo, gas natural, etc.

Por tanto, la biomasa energética puede definirse como materia orgánica, de origen vegetal o animal, incluyendo los materiales procedentes de su transformación natural o artificial y los residuos generados en su producción y consumo (Lalvay y Vidal, 2013; M R Pelaez et al., 2015)

Digestor de biogás

Los biodigestores son tanques o recipientes herméticos cerrados que permiten la carga o también conocido como afluente de sustratos y descarga conocido como efluente de bioabono-biol. Poseen un sistema de recolección y almacenamiento de biogás para su aprovechamiento energético, en este proceso se da el fenómeno de descomposición por microorganismos anaeróbicos que producen el biogás.

Este proceso se compone de un tanque de homogenización o alimentación, bombas, el tanque de biodigestión, agitadores, tuberías de captación de biogás, deposito para almacenar el biogás generado, tuberías, válvulas de seguridad, filtros de remoción de H₂S, quemadores y/o generadores (Corona Zuñiga, 2007; Culhae, 2012)

Biogás de vertedero.

Los residuos de vegetales, los animales muertos y también sus excrementos, se descomponen en la Naturaleza normalmente en contacto con el oxígeno del aire. Es lo que se conoce como degradación aerobia y en ella operan microorganismos que consumen oxígeno en su metabolismo. Sin embargo, a veces la descomposición de la materia orgánica se produce en ausencia del oxígeno del aire, esto es, en condiciones anaerobias.

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

De manera artificial, la degradación anaerobia es utilizada para la purificación de las aguas residuales urbanas, para la eliminación de los residuos sólidos urbanos en vertederos controlados y para el tratamiento de los excrementos de animales estabulados, conociéndose el gas generado en todos. El gas generado en este proceso consiste en aproximadamente (45%-60%) de gas metano y (40%-55%) de otros gases (tecnology, 2014)

Incineración de residuos

Radica en un proceso de tratamiento de residuos que involucra la combustión de sustancias orgánicas contenidas en los materiales de desechos. En la generalidad de los países donde hay presencia de este tipo de tecnología los incineradores construidos no traen la separación de materiales para eliminar los materiales peligrosos, voluminosos o reciclables antes de la combustión.

Estas instalaciones son un riesgo para la salud en modo general. La incineración de residuos es tratada como un proceso térmico, transforma toda la “basura o residuos” en cenizas, gases de combustión y calor. La ceniza generalmente es formada por los componentes inorgánicos de los residuos y puede tomar la forma de grumos o partículas sólidas. Los gases de combustión una vez son emitidos estos se deben limpiar y tratar ya que son agentes contaminantes a la atmosfera (Fryer et al., 2015; Ministro de medio ambiente y medio rural y marino, 2011)

Fotovoltaico

La energía solar fotovoltaica es una fuente de energía obtenida directamente a partir de la radiación solar mediante un terminal semiconductor denominado célula fotovoltaica, o bien mediante una deposición de metales sobre un sustrato denominada célula solar de película fina.

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

La energía fotovoltaica se usa tanto para producir electricidad en hogares o autos que ya cuenten con suministro de la red eléctrica, como para abastecer casas de campo o viviendas aisladas de la red eléctrica. Como consecuencia a la creciente demanda de energías renovables en todo el mundo, la fabricación de células solares e instalaciones fotovoltaicas ha avanzado considerablemente en los últimos años. La energía solar fotovoltaica no contamina de manera directa, pues se trata de una fuente sustentable que genera energía sin producir agentes que maltraten el medio ambiente, contribuyendo a evitar la emisión de gases de efecto invernadero (Morante, f., zilles, r., espinoza, r. y horn m. (2003).

La principal desventaja de la energía solar fotovoltaica es que la producción se ve afectada por las condiciones meteorológicas adversas, de ahí que los días con poco sol, nubes o que la suciedad se haya depositado sobre los paneles, se reduce drásticamente la producción del sistema fotovoltaico. Esto acarrea que para garantizar el suministro eléctrico es necesario complementar esta energía con otras fuentes de energía en base a combustibles fósiles, o pensar en la idea de sistemas híbridos (Jamal et al., 2020).

Gracias a los avances tecnológicos, la sofisticación y la economía de escala, el coste de la energía solar fotovoltaica se ha reducido de forma constante desde que se fabricaron las primeras células solares comerciales, aumentando a su vez la eficiencia, y logrando que su coste medio de generación eléctrica sea ya competitivo con las fuentes de energía convencionales en un creciente número de regiones geográficas, alcanzando la paridad de red (Eras, 2012; L. G. Marancela, 2012).

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Colectores solares

Los llamados colectores o captadores solares son dispositivos diseñados para recoger la energía solar y convertirla en energía térmica. El funcionamiento de un captador de energía solar suele ser sencillo, pero su efectividad dependerá directamente de los materiales de los que esté construido y del tipo de colector del que se trate. La razón de ser de estos paneles se encuentra en el llamado efecto invernadero.

Así, los rayos inciden en un vidrio exterior del colector que deja pasarlos al interior para que la placa colectora los transforme en energía térmica. El calor se acumula en la caja, calentando a su vez el líquido que circula cerca de ella, y desde allí se traslada a dónde se necesite.

Cuanto menor sea la diferencia entre el exterior y la caja del colector mayor será el rendimiento de éste, ya que la pérdida de energía será mínima. Por esa razón, en días fríos resulta complicado llegar a almacenar grandes cantidades de calor. Algo parecido ocurre en días nublados, puesto que si el colector no recibe radiación solar directa su funcionamiento no será óptimo (Morante, f., Zilles, r., Espinoza, r. y Horn m. (2003)).

Algunas ventajas y desventajas de las energías renovables.

En la tabla 5 se muestra una síntesis de algunas ventajas y desventajas relevantes de las fuentes de energía renovables que se someterán a escogencia en la presente investigación.

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Tabla 2 Ventajas y desventajas de algunas fuentes de energía renovables.

Biomasa	
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Energía neutral respecto a las emisiones de carbono. • El aprovechamiento de la energía contenida en la biomasa resulta muy económico. • La biomasa está disponible en grandes cantidades por todo el mundo.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • En determinadas zonas y dependiendo de las condiciones, puede resultar costosa. • Requiere de gran espacio para los diferentes procesos. • Impacto medio ambiental considerable, debido a su locación. (M. R. Peláez et al., 2015).
Digestor de Biogas	
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Es una energía sustentable y rentable, además de poder utilizar los productos secundarios como fertilizante. • Disminuye la tala de bosques al no ser necesario la leña para cocinar, por lo tanto, disminuye los residuos y se aprovecha todos los excedentes agrícolas alimentarios. • Tiene una diversidad de usos como la producción de energía eléctrica, transporte de automotor, cocción de alimentos entre otros.

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

- Desventajas**
- Un digestor siempre debe mantenerse a temperatura constante cerca de los 35° C, por ende, no es aplicable en climas fríos.
 - Los digestores requieren un trabajo diario, por la carga de materia orgánica, por lo tanto, es necesario que el digestor esté cerca para su procesamiento.
- (Corona Zuñiga, 2007; Culhane, 2012)

Vertedero de Biogas

- Ventajas**
- Relativamente económico en la trata controlada de residuos.
 - Baja inversión.
 - Tratamiento y mantenimiento sencillo.
 - Convierte un terreno árido en un terreno rico en materia orgánica.
- Desventajas**
- Requiere de grandes expansiones de terreno.
 - Produce malos olores.
 - Genera explosiones.
 - Puede provocar incendios.
 - Produce Lixiviados (liquido muy contaminante). (EVE, 2001; Juarez, 2016)

Incineración de Residuos

- Reducción en peso y volumen, hasta en un 95% de los residuos.
 - Alta disponibilidad y fiabilidad.
- Ventajas**
- Valorización energética de los residuos.
 - Disminución de la necesidad de vertederos.

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

- Altos costes de explotación.
- Sistema de tratamiento de gases complejo y costoso
- Tiempos largos de preparación del proyecto y de construcción.
- Rechazo social ya que existen grandes cuestionamientos con respecto a los impactos ambientales (Fryer et al., 2015)

Desventajas

Fotovoltaica

- Sus recursos son ilimitados.
- Su producción no produce ninguna emisión.
- Mantenimiento es sencillo y de bajo costo.
- El costo disminuye a medida que la tecnología va avanzando.
- Los paneles fotovoltaicos son limpios y silenciosos.
- Costos de instalación son altos por lo que requiere de una gran inversión inicial.
- Para recolectar energía solar a gran escala se requieren grandes extensiones de terreno.
- Escasos elementos almacenadores de energía económicos y fiables. (Eras, 2012; W. Macancela & Regalado, 2012)

Ventajas

Desventajas

Colectores solares

- Energía autónoma proveniente de una fuente gratuita e inagotable.
- Reduce la emisión de gases que causa el calentamiento global.
- Refleja ahorro del consumo eléctrico en un 50% aproximadamente.
- Valor adicional a la vivienda o industria.

Ventajas

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

	<ul style="list-style-type: none"> • Independiente de los altos costos del gas y la electricidad. • Su costo de instalación es recuperable a mediano plazo.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • La instalación de centrales termosolares puede tardar varios meses • Para el mayor aprovechamiento debe instalarse en terrenos extensos que, por ejemplo, podrían utilizarse para otros usos, como por ejemplo la agricultura • El sol no siempre está allí y los cambios climáticos no lo permiten. • Cuando se utiliza para calentar agua en uso doméstico, las épocas del año que tenemos más sol, es cuando menos se necesita este recurso (VEGA SALAS, P. (2003)

Métodos de decisión multicriterio

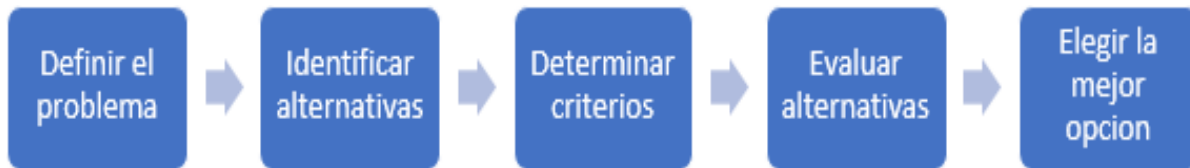
En gran variedad de ocasiones tanto en investigaciones como en procesos generales, se requiere tomar algún tipo de decisiones en la selección de alguna alternativa en particular. El objetivo de todos los métodos de decisión es seleccionar la mejor alternativa de tal forma que pueda satisfacer todas las necesidades para un objetivo especial.

Proceso en la toma de decisión

En la toma de decisiones están asociados una serie de etapas o pasos los cuales permiten la resolución de algún problema, se considera que las tres primeras etapas o pasos

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

permiten estructurar el problema, mientras que las dos últimas realizan el análisis del problema, en la figura 8 se puede observar gráficamente este proceso.



En el transcurso de la década de los 90 muchos métodos de decisión multicriterio (MCDM, del inglés Multi-Criteria Decision Making), emprendieron a tomar un mayor apogeo no solo en el ámbito académico, sino también al ser aplicado en ámbitos públicos, industriales y empresariales. Estas metodologías de técnicas de decisión se han utilizado desde entonces y hasta la actualidad en múltiples y diversas finalidades, convirtiéndose en una herramienta de gran importancia en la actualidad. Las técnicas de multicriterio se ocupan de la estructuración y resolución de problemas de decisión y planificación que albergan múltiples criterios y uno o más objetivos (García-Cascales & Jiménez, 2009).

El proceso de toma de decisión es directamente proporcional con la experiencia del decisor y rara vez en un método sistemático de resolución. Todo proceso de toma de decisiones resulta en un conjunto de técnicas que permiten solucionar problemas de decisión. Existe diferentes métodos de toma de decisión para cada tipo de problema (Morales Flores, 2011).

- Problemas estructurados: cuya solución es un método estándar
- Problemas no estructurados: son difusos y el método de solución no está definido

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

- Problemas semiestructurados: considera la combinación de soluciones paramétricas y la experiencia humana.

Los métodos MCDM se han utilizado en muchos estudios relacionados al tema energético ambiental, estas técnicas de toma de decisión han permitido analizar problemas a partir de decisiones multicriterio. En la tabla 3 se muestra cómo se han realizado algunos estudios con métodos multicriterio aplicados a energías renovables.

Tabla 3 Aplicación de energías renovables con utilización de métodos MCDM

Métodos	Ubicación	Descripción	Referencia
MCDA en cascada a las técnicas de ANN, AHP.	Reino Unido cerca del Trópico de Cáncer. Costera cinturón de Jamaica.	El estudio intenta abordar y proponer un nuevo método que es tanto objetivo como cognitivo, para identificar ubicaciones adecuadas donde se puede producir la cantidad óptima de energía de las olas.	(Ghosh, Chakraborty, Saha, Majumder, & Pal, 2016)
AHP	Sureste de las montañas del Atlas e incluye la región de Ouarzazate, Ghassate y Ait Zineb.	Se utilizaron cuatro criterios para evaluar un determinado conjunto de ubicaciones para llevar a cabo un proyecto de energía renovable, que se encuentra en la región de Marruecos, pretende estar conectado a la red eléctrica nacional del país.: ubicación,	(Tahri, Hakdaoui, & Maanan, 2015)

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

orografía, uso de la tierra y clima, y el

Proceso de Jerarquía Analítica (AHP)

para calcular los pesos de los criterios

correspondientes.

Fuzzy	Bandar Deylam	Este estudio permite encontrar la mejor	(Bagočiu
ANP,	en el Golfo	selección de sitios de parques eólicos	s,
Fuzzy	Pérsico en el	marinos, por lo que se tiene presente seis	Zavadskas,
Electre	suroeste de	criterios (profundidades y alturas,	& Turskis,
	Irán.	problemas ambientales, proximidad a las	2014;
		instalaciones, aspectos económicos,	Fetanat &
		niveles técnicos de recursos y cultura).	Khorasanine
			jad, 2015)
TOPSI		Analiza pequeños proyectos de	(Adhikary,
S,		energía hidroeléctrica (SHP)	Roy, &
VIKOR		proponiendo una solución sostenible,	Mazumdar,
		ecológica, a largo plazo y rentable con	2006)
		recursos de energía renovable para el	
		futuro. Este trabajo evalúa la	
		aplicabilidad de la optimización	
		multicriterio a los tomadores de	
		decisiones durante la selección del sitio	

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

del proyecto de la pequeña
hidroeléctria.

Selección de la técnica MCDM

En esta tesis de grado solo se va a hacer énfasis en dos métodos de decisión uno es el conocido como AHP y el otro será el FAHP por sus siglas en inglés, se realizará una explicación del proceso de ejecución de estos métodos y en el capítulo 4 se realizará el montaje de uno de ellos. Para la selección del método en esta tesis de grado se analizó cuál de los MCDM podría satisfacer las necesidades del problema propuesto, considerando vital la intervención de un decisor o grupo decisores. Es necesario establecer desde un comienzo un grupo finito de criterios que permitan evaluar cada una de las alternativas para de esta manera reflejar la importancia de cada criterio frente a cada alternativa.

Dicho método debe entregar una jerarquización que ayude a determinar la solución más adecuada del problema en estudio. Este método debe permitir validar los juicios entregados por los decisores, garantizando una confiabilidad en el resultado final de la alternativa que mejor se adapte a las exigencias del problema. Considerando de igual manera que un MCDM puede ser aplicado en el ámbito de las energías renovables.(Robles-Algarín et al., 2018)

De todos los métodos revisados en esta investigación se estableció el método FAHP y AHP propuesto por Saaty (1994), debido a su sencillez y flexibilidad al ser aplicado a problemas de múltiples atributos. Por otra parte, es uno de los métodos más estudiados y utilizados en cualquier campo relacionado con la toma de decisión multicriterio. AHP tiene la

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

facilidad de integrarse con otras técnicas, por lo que este método cumple con las expectativas para el estudio propuesto.(Kabak et al., 2014)

Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

AHP es una técnica y una metodología de apoyo a la decisión multicriterio que pretende resolver problemas complejos. Es una técnica muy usada en la selección de atributos múltiples, permite descomponer un problema en una jerarquía, asegurando que los aspectos cualitativos como cuantitativos, estén incorporados dentro del proceso de evaluación. Como se había ya explicado este método permite al agente decisor realizar comparaciones entre pares, atribuyendo un valor numérico para cada alternativa, lo que facilita la comprensión y el trabajo con el mismo, incorporando la participación de diferentes personas o un grupo de personas.

Metodología del Proceso Analítico Jerárquico

Las etapas generales de la metodología AHP propuestas por Saaty (1994), serán expuestas a continuación:

- **Modelización:** en esta primera etapa se construye un método donde quede representado todos los aspectos relevantes para el proceso de resolución, por lo tanto, su construcción es la parte más importante del proceso de resolución.
- **Valorización:** Se tiene presente las preferencias de los individuos mediante los juicios en las denominadas matrices de comparación por pares. A partir de estas matrices se puede relacionar dos elementos y compararlos.
- **Priorización y síntesis:** Genera prioridades para la resolución del problema,

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

en la que el individuo podrá comparar aspectos tangibles e intangibles.

- **Análisis de sensibilidad:** Este proceso el ultimo de las etapas propuestas por Saaty (1994), se realiza para examinar la sensibilidad del resultado obtenido en una decisión.

En términos generales, estas etapas antes mencionadas son expuestas a continuación en los siguientes pasos.

Paso 1: Estructurar el problema como una jerarquía.

Como primer paso del método AHP, se modela una estructura jerárquica, por lo que se adopta la siguiente forma, expresada en la Figura 9.

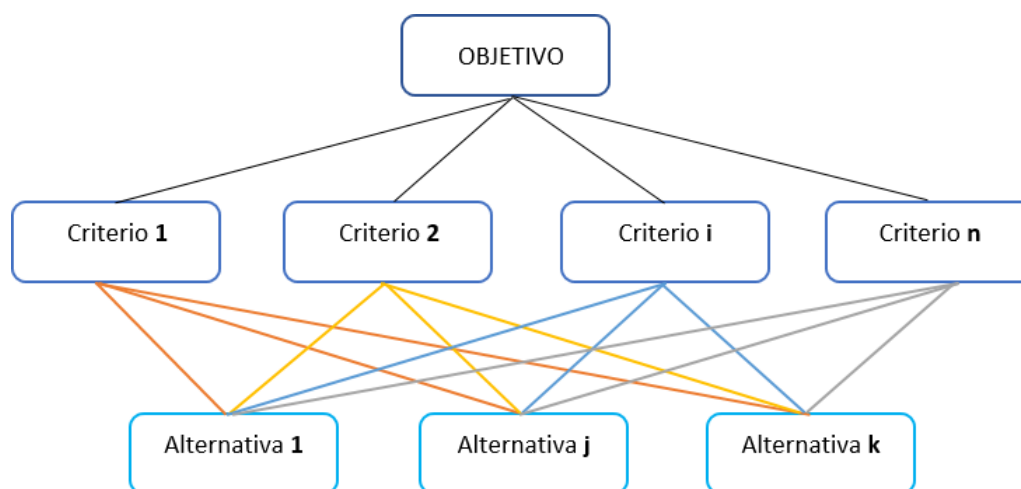


Figura 9 Estructura de jerarquías Analítica (Fuente: García-Cascales & Jiménez, 2009). Elaboración propia

En el nivel más alto o también llamado nivel superior de la jerarquía, se encuentra situada la meta u objetivo que se pretende alcanzar, y así elegir la mejor alternativa que satisfaga a la meta u objetivo. En el nivel intermedio se encuentran situados los criterios los cuales corresponden a parámetros importantes donde el

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

decisor o experto de la tematica puede justificar su elección. Por lo tanto, la selección adecuada de los criterios es esencial para un proceso de toma de decisión. Caso contrario si se definieran criterios que no son importantes para el problema, puede llevar a obtener resultados que podrían invalidar todo el proceso (García-Cascales & Jiménez, 2009).

Los criterios pueden depender o variar según sea el tipo de problema a analizar, por lo que se sugiere que los criterios deben ser comprensibles y medibles. Los criterios a su vez se pueden descomponer en subcriterios formando otra jerarquía (García-Cascales & Jiménez, 2009). En el último nivel se encuentran situadas las alternativas siendo un conjunto de opciones definidas. El agente decisor podrá efectuar su elección, y escoger la mejor alternativa que alcance a la solución del problema (García-Cascales & Jiménez, 2009; Parodi, 2013).

Paso 2: Cálculo de las prioridades entre los criterios

Para este segundo paso resulta importante lograr construir un vector de prioridades que permita evaluar la importancia que entrega el evaluador escogido a cada criterio. El valor numérico que asigna el decisor a cada criterio tiene que ser lo más ajustado posible. Para ello existen dos estrategias: asignación directa (mediante una escala definida que correlaciona valores de grado con valores numéricos) y la asignación indirecta (mediante técnicas de comparación entre criterios) (García-Cascales & Jiménez, 2009).

Una asignación indirecta o también conocida como asignación de pesos se ajusta en un análisis más íntegro ya que se realiza un cotejo entre pares de criterios, en base a una apreciación de los agentes decisores. La Tabla 4 muestra la escala

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

fundamental utilizada por AHP para las comparaciones por pares mostrada por Saaty.

Tabla 4 Escala Fundamental de Comparación Pareada

Intensidad de Importancia	Definición
1	Igual importancia
3	Importancia moderada
5	Fuerte importancia
7	Muy fuerte o importancia demostrada
9	Importancia extrema

Los valores 2,4,6 y 8 se denominan valores intermedios entre dos juicios.

Lógica Difusa

La lógica difusa trabaja con información inexacta, y es aplicada a cualquier tema donde exista algún grado de incertidumbre, logra representar el conocimiento común, de tipo lingüístico cualitativo no necesariamente cuantitativo, en un lenguaje matemático a través de la teoría de conjuntos difusos. Los términos lingüísticos utilizados contribuyen información útil para el raciocinio humano, por lo que la lógica difusa tiene mayor maleabilidad, tolerancia y la capacidad para modelar problemas no lineales y su base en el lenguaje natural (Osorio Gómez, 2011).

Proceso Analítico Jerárquico Difuso (FAHP)

En el contexto académico se pueden encontrar numerosos métodos AHP Fuzzy investigados y desarrollados por varios autores, todos siempre enfocados en la

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

selección de alternativas y buscando la justificación de un problema con un objetivo claro al cual se desea lograr, como se observa en la Tabla 5. Este proceso reúne números difusos a la metodología AHP, con la finalidad de disminuir la vaguedad del decisor (Mahendran, Moorthy, & Saravanan, 2014).

Esta metodología considera las tres etapas siguientes, las cuales se tienen en cuenta en la presente investigación:

- Construcción de la estructura jerárquica para el problema a ser resuelto.
- Obtención de la matriz Fuzzy de comparaciones
- Ranquear las alternativas y seleccionar la más adecuada

El método AHP difuso también conocido como FAHP, permite prevalecer el enfoque compensatorio, subjetivo y la incapacidad de AHP frente a la imprecisión de los juicios generados por parte de los decisores. Con FAHP se logra una descripción del proceso de toma de decisiones. Característicamente se trata de un enfoque de comparación de pares basada en números difusos triangulares, simbolizado por la triplete (l, m, u). Para la determinación de las matrices de comparaciones pareadas, existen varias propuestas. Büyüközkan (2004), propone valores difusos para los pesos de importancia de cada criterio.

Tabla 5 Aplicaciones del método AHP difuso. Elaboración propia

Autor	Aplicación
(Celik et al., 2009)	Aplicación de la metodología AHP extendida difusa en la selección de registro de buques. El caso de la

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

	industria marítima de Turquía.
(Durán & Aguilo, 2008)	Selección de la máquina-herramienta asistida por computadora basada en un método de aproximación AHP Fuzzy.
(Gao & Hailu, 2012)	Clasificación estrategias de gestión con resultados complejos: Una evaluación AHP-difusa de la pesca recreativa utilizando un modelo basado en agentes integral de un ecosistema de arrecifes de coral.
(Sahin, 2017)	Control de consistencia y priorización de coherencia experta para FFTA utilizando el método de análisis de extensión de FAHP trapezoidal.
(Zarghami, Azemati, Fatourehchi, & Karamloo, 2018)	Personalización de herramientas de evaluación de sostenibilidades bien conocidas para edificios residenciales iraníes utilizando AHP difuso.
(Yajure, 2015a)	Comparación de los métodos multicriterio AHP y AHP Difuso en la selección de la mejor tecnología para la producción de energía eléctrica a partir del carbón mineral.
(Durán, 2015)	Análisis de criticidad de piezas de repuesto utilizando

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

un enfoque AHP difuso

(Kabir & Akhtar Hasin, 2011)

Análisis comparativo de los modelos AHP y AHP Fuzzy para la clasificación de un inventario multicriterio.

Método de análisis extendido AHP con lógica difusa FAHP

El método FAHP por sus siglas en inglés, fue propuesto en el año 1996, este método para su desarrollo incorpora los llamados números difusos a la metodología AHP propuesta por Saaty en 1994, a continuación, se mostrará dicha incorporación. (Studi et al., 2013)

Sea $X = x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ un conjunto de varios objetos, y $Z = z_1, z_2, z_3, \dots, z_n$ un conjunto de objetivos. Acorde al método propuesto por Chang, toma cada objetivo y se realiza el análisis para cada objetivo respectivamente. De tal modo como se muestra en la ecuación (1) se puede obtener valores de análisis extendido “m” para cada uno de los objetos con la siguiente notación:

$$M_{gi}^1, M_{gi}^1, \dots, M_{gi}^1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

Donde todos los $M_{gr}^j \quad i = 1, 2, \dots, m$ son números triangulares difusos.

Para un mejor entendimiento de la metodología propuesta por Chang en esta investigación se explicará los pasos propuestos por Büyüközkan (2004).

Paso 1: existe un valor del cual resulta del análisis extendido con respecto al i-esimo objeto, está definido en la ecuación (2) como:

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \otimes \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} \quad (2)$$

Si se desea obtener $\sum_{j=1}^m M_{gi}^j$, se debe desarrollar la operación de adición de números difusos de los valores de análisis extendidos para m, para una matriz particular tal como se muestra en la ecuación (3):

$$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j = \sum_{j=1}^m l_j, \sum_{j=1}^m m_j, \sum_{j=1}^m u_j \quad (3)$$

Entonces para obtener $\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1}$, se desarrolla la operación de adición de números difusos M_{gi}^j ($j = 1, 2, \dots, m$) tal que:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j = \sum_{j=1}^m l_i, \sum_{j=1}^m m_i, \sum_{j=1}^m u_i \quad (4)$$

Para obtener la inversa de la ecuación (4) se realiza de la siguiente forma:

$$\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right)^{-1} = \frac{1}{\sum_{j=1}^m u_i}, \frac{1}{\sum_{j=1}^m m_i}, \frac{1}{\sum_{j=1}^m l_i} \quad (5)$$

Paso 2: en este paso se determina el grado de posibilidad que $M_2 \geq M_1$ y esto se puede detonar como se observa en la ecuación (6):

$$V(M_2 \geq M_1) = \sup(\min(u_{M_1}(x), u_{M_2}(y))) \quad (6)$$

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Ahora bien, existe un par de puntos (x, y) tal que $y \geq x$ y $u_{M_1}(x) = u_{M_2}(y)$ entonces se tiene que $V(M_2 \geq M_1) = 1$, además $M_1 = l_1, m_1, u_1$ y $M_2 = l_2, m_2, u_2$ son números difusos convexos tal como se muestra en la ecuación (7):

$$V(M_2 \geq M_1) = hgt(M_1 \cap M_2) = u_{M_2}(d) = \begin{cases} 1 & m_2 \geq m_1 \\ 0 & l_2 \geq l_1 \\ \frac{l_1 - l_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)} & \end{cases} \quad (7)$$

Donde d será la ordenada del punto de intersección más alto D entre u_{M_1} y u_{M_2} como se puede ver en la *Figura 10*.

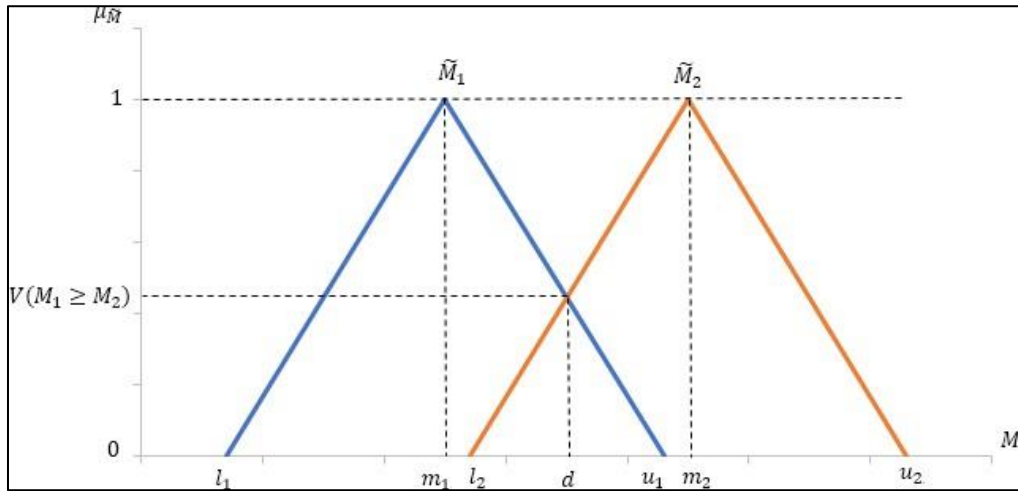


Figura 10 Intersección entre M_1 y M_2 . Elaboración propia

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Paso 3: Existe un grado de posibilidad para un numero difuso sea mayor de K números difusos convexos M_j ($i = 1, 2, \dots, k$) se define de la siguiente manera, se muestra en la ecuación (8):

$$V(M \geq M_1, M_2, \dots, M_k) = V(M \geq M_1) \text{ y } M \geq M_2 \text{ y } \dots \text{ y } M \geq M_k = \min V M \geq M_i \quad (8)$$

Siendo así, entonces se asume la ecuación (9):

$$d'(A_i) = \min s_i \geq s_k \quad (9)$$

Para que $k = 1, 2, \dots, n ; k \neq i$ por lo tanto, los pesos de los vectores están dados por la ecuación (10):

$$W' = d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n)^T \quad (10)$$

Paso 4: Para este paso se deben normalizar los pesos de los vectores tal como se puede observar la ecuación (11):

$$W' = d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n)^T \quad (11)$$

Para este caso se debe tener presente que W ahora no son números difusos, si no vectores con los pesos finales.

Escala difusa y nomenclatura para adquisición de información

Debido a que la naturaleza humana siempre genera incertidumbre al momento de asignar alguna valoración, se utiliza los siguientes números difusos con sus respectivas escalas tanto lingüísticas como triangular difusa, aplicando lo propuesto por Büyüközkan (2004). Esta escala que consta de nueve niveles será utilizada por los expertos para la adquisición de información, por lo tanto, se representa el conjunto **WW** como:

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

$$W = AMEI, MFMEI, FMEI, DMEI, II, DMAI, FMAI, MFMAI, AMAI$$

Nomenclatura propuesta por *Büyüközkan*

- **AMEI:** Absolutamente menos importante
- **MFMEI:** Muy fuertemente menos importante
- **FMEI:** Fuertemente menos importante
- **DMEI:** Débilmente menos importante
- **II:** Igualmente importante
- **DMAI:** Débilmente más importante
- **FMAI:** Fuertemente más importante
- **MFMAI:** Muy fuertemente más importante
- **AMAI:** Absolutamente más importante

Todos los juicios obtenidos por parte de los expertos se basaron en números difusos, por lo que es necesario convertir estos valores a su respectiva escala triangular difusa, como se observa en la Tabla 6:

Tabla 6 Escala difusa triangular. Elaboración propia

Números Difusos	Escala Lingüística	Escala triangular Difusa	Escala triangular difusa reciproca
1	II	(1,1,1)	(1,1,1)
	II	(1/2, 1, 3/2)	(2/3, 1, 2)
3	DMAI	(1, 3/2, 2)	(1/2, 2/3, 1)

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

5	FMAI	$(3/2, 2, 5/2)$	$(2/5, 1/2, 2/3)$
7	MFMAI	$(2, 5/2, 3)$	$(1/3, 2/5, 1/2)$
9	AMAI	$(5/2, 3, 7/2)$	$(2/7, 1/3, 2/5)$

Modelación difusa

Es la aplicación de la lógica difusa y la teoría de conjuntos difusos para modelar fenómenos a través de reglas difusas. Por ejemplo, en procesos de control y toma de decisiones se podrían aplicar sistemas difusos ver Figura 11. Un sistema difuso consta de cuatro fases: Fuzificación, bases de reglas difusas, inferencia y desfuzificación. La Fuzificación es la primera fase donde se establece una función desde X a todos los conjuntos borrosos en X . En otras palabras, a un número real \in se le asigna un grado de pertenencia a un conjunto borroso A . Luego están las reglas difusas que es una colección de reglas que describe la relación entre las acciones y los estados del sistema. Las reglas están expresadas en la forma si $(A1)$ y/o $(A2) \dots (An)$ entonces (Cn) donde (An) y (Cn) son las acciones y los estados del sistema respectivamente para $n \in N$ (Encarnación, Yamir (2013)).

En tercer lugar, está la inferencia que es una regla de deducción para determinar una salida difusa basada en un conjunto arbitrario en X , y, por último, la desfuzificación que es un operador que transforma conjuntos borrosos a números reales. Existen varios métodos de desfuzificación siendo uno de los más utilizados el centro de gravedad (Encarnación, Yamir (2013)).

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

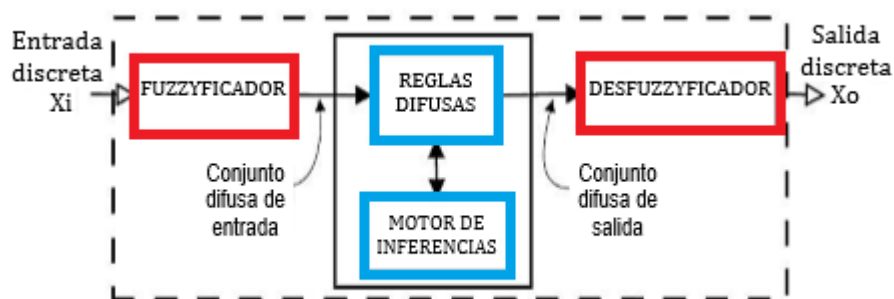


Figura 11 Sistema Difuso.

El bloque fuzzyficador es el bloque en que cada variable de entrada se le asigna un grado de pertenencia a cada uno de los conjuntos difusos que se logre considerar, esto se logra gracias a las funciones características asociadas a estos conjuntos difusos. Las entradas a este bloque son valores concretos de las variables de entrada a las salidas son grados de pertenencia a los conjuntos difusos que se consideren.

El bloque de inferencia mediante lo que se denomina motor de inferencia tiene la función de relacionar los conjuntos difusos de entrada y los de salida y que representan a las reglas que definen el sistema. Se debe ser claro que las entradas de este bloque son conjuntos difusos y las salidas son también conjuntos difusos asociados a la variable de salida.

El bloque desfuzzyficador es en el cual donde a partir de un conjunto difuso obtenido previamente en el mecanismo de inferencia y aplicando los métodos matemáticos de desdifusión se obtiene un valor concreto de la variable de salida, es decir se debe obtener el valor esperado (Buckley, J.J., Yan, A. (2000)).

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Capítulo 3.

Para un desarrollo óptimo y fiable de este proceso de investigación, se propone dentro de la metodología la realización del siguiente plan de actividades, teniendo presente la estructura de los objetivos específicos y lo que se desea alcanzar en el objetivo general.

Actividades para desarrollar en cada uno de los objetivos específicos:

1.1	Realizar la revisión bibliográfica de investigaciones a nivel nacional e internacional en el área de planificación energética.
1.2	Revisar el estado del arte de los métodos de decisión multicriterio, haciendo especial énfasis proceso de jerarquía analítica difusa (FAHP) y de aquellas técnicas que puedan servir para contrastar resultados.
1.3	Plantear el marco teórico sobre el que se asientan los métodos de decisión multicriterio, especialmente proceso de jerarquía analítica difusa (FAHP) y justificar su aplicación en la presente investigación
1.4	Hacer la modelación de la jerarquización del problema a solucionar.

2.1	Diseñar un cuestionario para recoger la opinión de expertos sobre la importancia de los factores críticos que se hayan identificados y las alternativas de solución que se propongan.
-----	---

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

2.2	Aplicar el cuestionario a un grupo de experto, analizar la información obtenida y priorizar los factores críticos y alternativas mediante el proceso de jerarquía analítica difusa (FAHP).
3.1	Medir la importancia que el decisor le asigna a cada uno de los criterios y subcriterios, estableciendo matrices de toma de decisiones.
3.2	Definir los criterios y subcriterios relevantes en orden jerárquicos que ayuden a tomar la mejor decisión frente a las diferentes alternativas planteadas inicialmente, así mismo como la ponderación y jerarquización de estos para futuras investigaciones

Escogencia de grupo de expertos (encuestadores)

Para un proceso exitoso de análisis de decisión, es necesario que el grupo de expertos conozcan del tema a evaluarse. Por esta razón se debe considerar a los expertos más relevantes sobre la temática que se está estudiando se realizara una consulta a un grupo de expertos los cuales se podrán distribuir de la siguiente forma: 1) Empresas o empleados del sector de las fuentes renovables de energía; 2) Profesores universitarios investigadores con experiencia en proyectos de planificación energética; 3) Empleados públicos con funciones asociadas al uso racional de los recursos y proyectos de planificación energética; 4) Organizaciones no gubernamentales protectoras del medio ambiente; y 5) Organizaciones pertenecientes a las comunidades rurales. Esto con el fin de ser más selectivo y objetivo a la hora de tomar los criterios, el experto debe conocer el área que se va a tratar, respecto a la tecnología que se vaya a evaluar (Zapata, 2011).

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Uso de la metodología FAHP

Tal cual como se ha descrito en todo el desarrollo de esta tesis, la situación problema a solucionar radica en implementar una energía renovable la cual permita suministrar energía eléctrica teniendo prioridad todos aquellos recursos y criterios que estén presente en la zona de desarrollo del proyecto. Siendo consecuente con el problema central de esta tesis y la zona donde se desea desarrollar se ha seleccionado un conjunto de tecnologías, de criterios y subcriterios la cual se espera que disminuirán el uso o la dependencia de combustibles fósiles. Teniendo en cuenta que es un proceso donde se comparan diferentes alternativas basadas en criterios y subcriterios establecidos previamente, es necesario realizar un esquema jerárquico de tal forma que ayude a descomponer el problema central en diferentes partes, tal como se muestra en la *Figura 12*.



Figura 12 Esquema Jerárquico dispuesto para el estudio

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Planteamiento de alternativas

Para la selección de las distintas alternativas que se proponen en esta tesis, se tuvieron presente las más destacadas en diferentes artículos de la literatura se resaltan los estudios de (Deveci & Güler, 2020), (Bhattacharyya, 2012) entre otros, donde se describen diferentes tipos de tecnologías que pueden ser aplicadas en zonas rurales o zonas no interconectadas, utilizando los recursos disponibles, como los criterios y subcriterios estudiados en la zona de desarrollo del proyecto. Se identificaron seis tecnologías que se pueden emplear en la zona rural seleccionada y las zonas no interconectadas aledañas a esta, (Solar Fotovoltaica (A1), Eólica (A2), Digestor de Biogás(A3), Biogás de Vertederos (A4), Incineración de residuos (A5) y Solar por Colectores solares (A6)), dichas alternativas fueron explicadas en el capítulo 2.3 y 2.4. Estas tecnologías pueden ser aprovechadas y transformadas en energía, para su disposición en la generación de electricidad dentro del municipio de Piojo.

Planteamiento de Criterios

En la selección de los criterios y de los subcriterios se estableció un conjunto de criterios cualitativos, considerados como medios de comparación entre las diferentes alternativas. Estos parámetros influyen en la toma de decisión multicriterio para la selección de las tecnologías a ser aplicadas. Los criterios considerados se basan en el estudio de diferentes artículos y/o publicaciones que se investigaron en diferentes base de datos, alguna de las publicaciones que sirvieron como base para la escogencia de estos criterios y subcriterios son (John et al., 2014), (Robles-Algarín et al., 2018) y (Jamal et al., 2020), a continuación, se detallan todos los criterios en forma individual y cada subcriterio asociado.

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Criterios: Sociales (C1), Económicos (C2), Ambientales (C3) y Técnicos (C4).

Subcriterios: Aceptación social (C1.1), Generación de trabajo (C1.2), Obstáculos en Zonas (C1.3), Disponibilidad de zona (C1.4) y Vandalismo y/o terrorismo (C1.5), Capital Inicial (C2.1), Costo de operación y mantenimiento (C2.2), Valor actual neto (C2.3), Costo de generación electricidad (C2.4), Facción renovable (C3.1), Huella de carbono (C3.2), Impacto ecosistema (C3.3), Eficiencia (C4.1), Fiabilidad (C4.2), Disponibilidad de la fuente (C4.3) y madures de la tecnología (C4.4).

A continuación, se realizará una explicación general de cada uno de subcriterios, para un mejor entendimiento:

Aceptación social (C1.1):

El impacto visual que podría causar la implementación de una energía renovable en una zona podría desagradar o agradar a gran parte de la población. Este subcriterio es clave al momento de evaluar las tecnologías, ya que considera el grado de aceptabilidad que tiene la población en la instalación de tecnologías renovables.

Generación de trabajo (C1.2):

Llevar a cabo un proyecto de generación de energía limpia, renovable, requiere la intervención de un personal variado. La intervención de la mano de obra es esencial para completar cada fase del proyecto, desde la planificación de la obra, para luego seguir a la ejecución y finalmente llegar a la operación, se recomienda

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

que esta mano de obra calificada sea da la población y zonas cercanas.

Obstáculos en Zonas (C1.3):

La extracción de energía de algún recurso renovable no es tarea sencilla, muchas tecnologías requieren de grandes o amplios terrenos. Es necesario la disponibilidad de terreno para implementar una tecnología, logrando ser aplicadas dentro de una zona urbana o rural sin mayor problema.

Disponibilidad de zona (C1.4):

Debe entenderse que cada región es un área geográfica totalmente independiente. Cada región de nuestro territorio tiene ubicaciones o zonas aisladas, conocidas como zonas de disponibilidad. Dichas zonas proporcionan la capacidad de colocar recursos, desarrollar proyectos, en varias ubicaciones más cercanas a sus usuarios finales.

Vandalismo y/o terrorismo (C1.5):

Este subcriterio es determinante en muchas ocasiones a la hora de desarrollar un proyecto civil en nuestro territorio nacional, se debe estudiar la presencia de grupos armados al margen de la ley y el impacto que esto pueda tener sobre el desarrollo y presencia del proyecto en la zona.

Capital Inicial (C2.1):

Para llevar a cabo cualquier proyecto, es necesario considerar la inversión o el capital inicial, debido al costo de los equipos y maquinarias necesarios para dar inicio al proyecto. Por otra parte, cualquier inversor o parte interesada, analizará los gastos que se podrían generar por la instalación de una tecnología.

Costo de operación y mantenimiento (C2.2):

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Al momento de hacer toda transformación energética se depende directamente de un gran número de maquinarias y equipos directamente dependientes de mantenimientos periódicos, con la finalidad de alargar la vida útil de los mismos. Generando costos adicionales, los cuales se deben considerar y analizar en forma detallada.

Valor actual neto (C2.3):

El valor actual neto es un indicador financiero que sirve para determinar la viabilidad de un proyecto. Luego de medir los flujos de los futuros ingresos y egresos y descontar la inversión inicial queda alguna ganancia, entonces se determina que el proyecto es viable.

Costo de generación electricidad (C2.4):

En todo proyecto energético es de vital importancia la evaluación de cuanto será el costo del kW generado, este dato determinará la valoración del proyecto a futuro, se debe mitigar cualquier variable que logre aumentar el costo de generación.

Fracción renovable (C3.1):

Hace referencia a la cantidad de energía, equipos o productos que una vez usado este puede nuevamente a reutilizarse en alguna otra actividad, o también cualquier equipo, producto u actividad que provenga del uso de una fuente renovable.

Huella de carbono (C3.2):

La huella de carbono se define como la totalidad de gases de efecto invernadero emitidos por efecto directo o indirecto por un individuo, organización, evento o producto.

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Impacto ecosistema (C3.3):

Es un cambio o una alteración en el medio ambiente, siendo una causa o un efecto debido a la actividad y a la intervención humana. Este impacto en el ecosistema puede ser positivo o negativo, el negativo representa un quiebre en el equilibrio ecológico, causando graves daños y perjuicios en el medio ambiente, así como en la salud de las personas y demás seres vivos

Eficiencia (C4.1):

Es la relación entre la energía útil y la energía que se invierte. Si se toma de una forma cualitativa, en este caso la eficiencia será mayor, al presentarse una cantidad mayor de energía disponible.

Fiabilidad (C4.2):

Se utiliza la palabra fiable para referirnos a que algo es confiable y que dará el mismo resultado siempre, es un subcriterio importante a la hora en todo proyecto, se debe garantizar la continuidad al mejor rendimiento posible a lo largo del tiempo.

Disponibilidad de la fuente (C4.3):

Si se requiere producir energía eléctrica es necesario una fuente primaria de donde se obtenga, esta dependerá de su localidad para aprovechar su capacidad. La disponibilidad de fuente primaria define si se puede o no aprovechar al máximo un recurso para transformarlo en energía, dependiendo de su zona de aplicación.

Madurez de la tecnología (C4.4):

La madurez tecnológica de las tecnologías renovables ha primado al momento de optar

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

por la inclusión de un recurso renovable. Es vital contar con una tecnología madura, que asegure un mejor rendimiento con la finalidad de captar grandes beneficios económicos y ambientales.

Recolección de juicios para aplicar el método FAHP

El objetivo de esta metodología consiste en lograr analizar los criterios, subcriterios y alternativas de una estructura jerárquica, con el propósito de poder obtener los juicios emitidos por cada uno de los expertos a los que se consultaron, los cuales para esta investigación fueron un total de 10 y en su gran mayoría son docentes investigadores.

La importancia de este método consiste en la comparación por pares, donde resulta necesario poder generar una evaluación emitida por un individuo o un grupo de interés a los cuales se les denomina expertos, el éxito en esta etapa dependerá de los conocimientos del grupo de decisores. Cada una de las preguntas de las encuestas están adecuada a los intereses propios de cada experto, que expresará su favoritismo a cada criterio asignando una escala, según la escala de Satty, con el fin de asignar pesos a cada criterio evaluado. Los datos obtenidos de las encuestas serán analizados para un posterior cálculo de comparación.

Un ejemplo de cómo se podrá evaluar cada criterio o subcriterio según las alternativas se observa en la Figura 13, donde se compara uno de los subcriterios con cada una de las alternativas. Se aplicó un tipo de encuesta denominada “matriz bipolar” la cual consiste en una tabla de la cual muestra dos extremos de una escala con los extremos establecidos por el administrador de la encuesta. Los encuestados es decir los expertos seleccionan un punto entre los dos extremos, acorde a su conocimiento frente a los

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

conceptos comparados en los extremos de la matriz. Estos puntos también pueden ser etiquetados para ayudar a guiar a los encuestados a través de la escala. Lo que se busca es crear un registro acorde a la escala de Satty en cada una de las matrices bipolar que se empleen, para la creación de este tipo de matrices se utilizó un programa en línea denominado *questionpro* el cual por un periodo de tiempo permite al usuario de manera gratuita utilizar todos los servicios que este ofrece.

Seguidamente se explica bajo un ejemplo real utilizado en esta investigación, como es el manejo de estas matrices bipolar. Si se desea saber la opinión de los expertos sobre un criterio como lo es el capitán inicial, frente a las distintas alternativas de energía, por lo tanto, si capital inicial se considera más importante en algunas de las fuentes de energía renovables, se coloca una valoración en la parte izquierda de la escala, en cambio si se considera menos importante se colocará una valoración del lado derecho, siempre teniendo presente las comparaciones de las fuentes de energía ubicadas en las columnas de la derecha y de la izquierda de cada una de las preguntas en mención.

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

3.7 Evaluación de las razones de consistencia y matrices de jerarquización.

* Si se comparan desde un punto de vista del "CAPITAL INICIAL" la energía de la "COLUMNA IZQUIERDA" versus la energía de la "COLUMNA DERECHA", esta resulta ser:

	Extremadamente más importante	Mucho más importantes	Bastantemente más importante	Moderadamente más importante	IGUAL	Moderadamente menos importante	Bastantemente menos importante	Mucho menos importantes	Extremadamente menos importante	
SOLAR FOTOVOLTAICA	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	EÓLICA
SOLAR FOTOVOLTAICA	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	DIGESTOR DE BIOGAS
SOLAR FOTOVOLTAICA	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	BIOGAS DE VERTEDEROS
SOLAR FOTOVOLTAICA	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	INCINERACIÓN DE RESIDUOS
SOLAR FOTOVOLTAICA	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	COLECTORES SOLARES
EÓLICA	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	DIGESTOR DE BIOGAS
EÓLICA	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	BIOGAS DE VERTEDEROS
EÓLICA	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	INCINERACIÓN DE RESIDUOS
EÓLICA	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	COLECTORES SOLARES
DIGESTOR DE BIOGAS	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	BIOGAS DE VERTEDEROS
DIGESTOR DE BIOGAS	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	INCINERACIÓN DE RESIDUOS
DIGESTOR DE BIOGAS	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	COLECTORES SOLARES
BIOGAS DE VERTEDEROS	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	INCINERACIÓN DE RESIDUOS
BIOGAS DE VERTEDEROS	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	COLECTORES SOLARES
INCINERACIÓN DE RESIDUOS	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	COLECTORES SOLARES

Figura 13 Ejemplo de encuesta para evaluación de subcriterios por alternativas.

La matriz de comparación pareada refleja la importancia de un atributo con respecto a otro, sin embargo, siempre es necesario validar la consistencia de los juicios que brindan los expertos para obtener una matriz de comparación válida y precisa en sus respuestas. En la Tabla 7 se puede observar la matriz de decisión de unos de los expertos, en este ejemplo se observa la comparación entre los criterios.

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Tabla 7 Matriz de comparación entre criterios

	ECONÓMICO	SOCIAL	AMBIENTALES	TÉCNICOS
ECONÓMICOS	1	3	3	1
SOCIAL	1/3	1	1/3	3
AMBIENTALES	1/3	3	1	1
TÉCNICOS	1	1/3	1	1
suma	2,6667	7,3333	5,3333	6,0000
Matriz de decisión 1				

En la Tabla 8 se logra observar la normalización de la matriz de decisión de unos de los expertos, el cual es un paso importante en la determinación del índice de consistencia y el radio de consistencia.

Tabla 8 Matriz de valores normalizados

	ECONÓMICO	SOCIAL	AMBIENTALES	TÉCNICOS
ECONÓMICOS	3/8	0,4091	0,5625	0,1667
SOCIAL	1/8	0,1364	0,0625	0,5000
AMBIENTALES	1/8	0,4091	0,1875	0,1667
TÉCNICOS	3/8	0,0455	0,1875	0,1667
Matriz Normalizada total				

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

En la Tabla 9 se muestra el índice de consistencia y el radio de consistencia de los valores obtenidos en la matriz de la Tabla 7, se nota que el radio de consistencia es inferior a 0.1, permitiendo determinar la validez y precisión de los valores plasmados en la matriz.

Tabla 9 Determinación del índice de consistencia y radio de consistencia.

λ máx.	Índice de consistencia (C.I)	Radio de consistencia
4,0045	0,0015	0,0015

Para determinar el índice de consistencia se empleó la ecuación:

$$Ic = \frac{n_{max}-n}{n-1} \quad (12)$$

Donde n representa el número de columnas o renglones de la matriz.

El radio de consistencia determina la aceptabilidad o no aceptabilidad de los valores presente en una matriz de decisión, para su cálculo se utiliza la ecuación:

$$Rc = \frac{Ic}{IA} \quad (13)$$

Donde Ic representa el índice de consistencia e IA representa el índice de consistencia aleatorio, el cual se determina:

$$IA = \frac{1.98 (n-2)}{n} \quad (14)$$

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

En caso de que una matriz no sea consistente es decir que su R_c sea mayor a 0.1, se debe de reevaluar los valores mostrados en dicha matriz y nuevamente calcular el R_c para determinar si ahora es consistente.

Una vez se verifique que todas las matrices de decisión que se emplearan en la metodología Fuzzy sean consistente, se procede a la aplicación de la metodología, en primera instancia se realizó la comparación de los criterios obteniéndose la matriz de la Tabla 10, donde se puede apreciar que según la decisión de los expertos consultados los criterios económicos ocupan el primer puesto a la hora de la instalación de una fuente de energía renovable, seguidos por los ambientales, técnicos y sociales.

Tabla 10 Jerarquización de los criterios

Pesos	%	Criterios
normalizados		
0,396356123	40%	ECONÓMICOS
0,141884105	14%	SOCIAL
0,308115218	31%	AMBIENTALES
0,153644554	15%	TÉCNICOS

Una vez se tengan todos los criterios jerarquizados y cuantificados se procede a evaluar y jerarquizar los subcriterios que pertenecen a cada criterio, esto con el fin de determinar el peso de importancia que tienen dentro de cada uno de los criterios. En la

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Tabla 11 se aprecia los resultados obtenidos gracias a los expertos en la ponderación y jerarquización de los subcriterios que hacen parte del criterio económico, se observa que dentro del criterio económico el subcriterio con mayor ponderación e importancia a la hora de hacer una instalación de energía renovable es el del costo de operación y mantenimiento, seguido por costo de generación de electricidad, capital inicial y valor actual neto.

Tabla 11 Jerarquización de los subcriterios económicos.

Pesos	%	Criterios
normalizados		
0,396356123	40%	ECONÓMICOS
0,141884105	14%	SOCIAL
0,308115218	31%	AMBIENTALES
0,153644554	15%	TÉCNICOS

Este mismo procedimiento se repetirá para lograr ponderar y jerarquizar los subcriterios que hacen parte de cada uno de los criterios que se tuvieron presente a la hora de decidir por la mejor fuente de energía renovable en nuestra zona de estudio. En las Tablas desde la 12 hasta la 14, se presentan los resultados obtenidos en la ponderación y jerarquización de los subcriterios relacionados con los criterios ambientales, técnicos y sociales.

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

TABLA 12 Jerarquización de subcriterios ambientales

Pesos	%	Subcriterios
normalizados		
0,650782672	65%	Fracción renovable
0,126290306	13%	Huella de carbono
0,222927022	22%	Impacto en el ecosistema

La Tabla 12 muestra que, dentro del criterio ambiental, sus subcriterios están jerarquizados de tal forma que la fracción renovable tiene mayor ponderación, seguido por el impacto en el ecosistema y por último la huella de carbono.

En la Tabla 13 se logra observar la ponderación y jerarquización de los subcriterios adscritos al criterio técnico, se refleja que dentro del criterio técnico resulta de mayor importancia la eficiencia de la tecnología a utilizar, seguido por la fiabilidad, madurez de la tecnología y por último disponibilidad de la fuente.

Tabla 13 Jerarquización de subcriterios técnicos.

Pesos	%	Subcriterios
normalizados		
0,362277614	36%	EFICIENCIA
0,336916142	34%	FIABILIDAD

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

0,116082886	12%	DISPONIBILIDAD DE LA FUENTE
0,184723358	18%	MADUREZ TECNOLOGÍA

Por último, se muestra la Tabla 14 donde ponderan y jerarquizan los subcriterios adscritos al criterio social. Para dicho criterio resulto de mayor importancia el subcriterio generación de trabajo, seguido por los subcriterios disponibilidad de la zona, aceptación social, vandalismo y/o terrorismo y por último obstáculos de la zona.

Tabla 14 Jerarquización de subcriterios sociales.

Pesos normalizados	%	Subcriterios
0,204982421	20%	ACEPTACIÓN SOCIAL
0,347711775	35%	GENERACIÓN DE TRABAJO
0,090121289	9%	OBSTÁCULOS EN ZONA
0,239533891	24%	DISPONIBILIDAD DE ZONA

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

0,117650623	12%	VANDALISMO Y/O TERRORISMO
--------------------	------------	--------------------------------------

Habiendo obtenido la ponderación y jerarquización de los criterios a modo general así mismo la ponderación y jerarquización de cada subcriterio adscrito a cada criterio el paso a seguir es el cálculo de la ponderación y jerarquización de cada uno de los subcriterios frente a cada una de las alternativas evaluadas.

La Tabla 15, representa el cálculo de la ponderación y jerarquización del subcriterio capital inicial frente a cada una de las alternativas evaluadas. Este cálculo arrojará la importancia que tiene este subcriterio frente a la comparación de las alternativas de energías renovables.

Tabla 15 Jerarquización del subcriterio capital inicial frente a cada alternativa.

Pesos	%	Alternativas
normalizados		
0,265898135	27%	SOLAR FOTOVOLTAICA
0,247014537	25%	EÓLICA
0,110275776	11%	DIGESTOR DE BIOGÁS
0,145909129	15%	BIOGÁS DE VERTEDEROS

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

0,04521281	5%	INCINERACIÓN DE RESIDUOS
0,185689613	19%	COLECTORES SOLARES

La Tabla 16 hasta las 19 también llamada matriz de pesos locales por alternativa muestra la matriz de comparación de cada subcriterio frente a cada una de las alternativas, esta matriz es formada con los resultados obtenidos de cada peso normalizados en cada comparación, a su vez la Figura 30 muestra la matriz de la ponderación y jerarquización de cada criterio y así mismo la ponderación local y global de cada subcriterio adscrito a cada criterio, esta matriz también se denota con el nombre de matriz de pesos de segundo y tercer nivel.

Las matrices mostradas en las Tablas 16 hasta la 19 son de gran importancia ya que la unificación de estas dos matrices conducirá a una matriz de decisión final, en la cual se determinará cuál de las fuentes de energía renovables propuestas para la zona de estudio es la mejor opción según el criterio del grupo de experto acudido, la Tabla 21 muestra un resumen de todos los valores obtenidos en la presente investigación, reflejando las ponderaciones y jerarquizaciones de cada alternativa frente a cada subcriterios, de cada criterios evaluado y la evaluación de cada subcriterio frente a los demás.

Tabla 16 Ponderación de Subcriterios del criterio 1 vs Alternativas.

C1 (14%)

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Alternativas	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5
A1	0,34128016	0,27689709	0,2740019	0,31643269	0,25979155
A2	0,26428897	0,21096475	0,17043255	0,11901796	0,19173787
A3	0,09609312	0,13970683	0,11225884	0,11048195	0,12994408
A4	0,09773697	0,11988076	0,11218354	0,10851942	0,1380537
A5	0,07634842	0,09658874	0,09139943	0,11048195	0,1042857
A6	0,12425236	0,15596183	0,23972373	0,23506604	0,17618709

En la Tabla 16 se observa que para el subcriterio C1.1 obtuvo una mayor ponderación porcentual en la alternativa A1 con un valor de 34.12%, el subcriterio C1.2 obtuvo una mayor ponderación porcentual en la alternativa A1 con un valor de 27.68%, el subcriterio C1.3 obtuvo una mayor ponderación porcentual en la alternativa A1 con un valor de 27.40%, el subcriterio C1.4 obtuvo una mayor ponderación porcentual en la alternativa A1 con un valor de 31.64% y , el subcriterio C1.5 obtuvo una mayor ponderación porcentual en la alternativa A1 con un valor 25.97%

Tabla 17 Ponderación de Subcriterios del criterio 2 vs Alternativas.

C2 (40%)				
Alternativas	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4
A1	0,26589814	0,05496679	0,06049416	0,04729572
A2	0,24701454	0,06102095	0,15157953	0,12943976
A3	0,11027578	0,11173231	0,31552875	0,28250111

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

A4	0,14590913	0,20418324	0,20053137	0,27430778
A5	0,04521281	0,34940696	0,08590461	0,17219761
A6	0,18568961	0,21868975	0,18596158	0,09425802

En la Tabla 17 se observa que para el subcriterio C2.1 obtuvo una mayor ponderación porcentual en la alternativa A1 con un valor de 26.58%, el subcriterio C2.2 obtuvo una mayor ponderación porcentual en la alternativa A5 con un valor de 34.94%, el subcriterio C2.3 obtuvo una mayor ponderación porcentual en la alternativa A3 con un valor de 31.55%, y el subcriterio C3.4 obtuvo una mayor ponderación porcentual en la alternativa A3 con un valor de 28.35%.

Tabla 18 Ponderación de Subcriterios del criterio 3 vs Alternativas.

C3 (31%)				
Alternativas	C1.1	C3.1	C3.2	C3.3
A1	0,34128016	0,17251226	0,0637428	0,30174537
A2	0,26428897	0,26342477	0,07358727	0,20125383
A3	0,09609312	0,13501334	0,31037045	0,1484536
A4	0,09773697	0,1347605	0,25609738	0,15318834
A5	0,07634842	0,18561093	0,11049767	0,06310921
A6	0,12425236	0,10867821	0,18570442	0,13224966

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

En la Tabla 18 se observa que para el subcriterio C3.1 obtuvo una mayor ponderación porcentual en la alternativa A1 con un valor de 34.12%, el subcriterio C3.2 obtuvo una mayor ponderación porcentual en la alternativa A2 con un valor de 26.34%, y el subcriterio C3.3 obtuvo una mayor ponderación porcentual en la alternativa A1 con un valor de 30.17%.

Tabla 19 Ponderación de Subcriterios del criterio 4 vs Alternativas.

C4 (15%)					
Alternativas	C1.1	C4.1	C4.2	C4.3	C4.4
A1	0,34128016	0,4290604	0,45287186	0,32353098	0,3484389
A2	0,26428897	0,09891145	0,17974367	0,1378852	0,20982633
A3	0,09609312	0,17972048	0,14467231	0,13522958	0,1044756
A4	0,09773697	0,14321795	0,09282212	0,13766767	0,10743315
A5	0,07634842	0,05428729	0,0409151	0,06495761	0,06432166
A6	0,12425236	0,09480243	0,08897494	0,20072896	0,16550436

En la Tabla 19 se observa que para el subcriterio C4.1 obtuvo una mayor ponderación porcentual en la alternativa A1 con un valor de 34.12%, el subcriterio C4.2 obtuvo una mayor ponderación porcentual en la alternativa A1 con un valor de 42.29%, el subcriterio C4.3 obtuvo una mayor ponderación porcentual en la alternativa A1 con un valor de 45.28%, y el subcriterio C4.4 obtuvo una mayor ponderación porcentual en la alternativa A1 con un valor de 34.84%

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Tabla 20 Matriz de comparación de criterio 1 y subcriterios.

C1 (14%)					
PESOS	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5
LOCAL	20	35	9	24	12
%					
GLOBAL	2,8	4,9	1,26	3,36	1,68
%					

En la Tabla 20 se muestra que el subcriterio con mayor importancia o ponderación en el criterio C1. (social), es el correspondiente a la generación de trabajo con un valor de 35% de un total de 100%

Tabla 21 Matriz de comparación de criterio 2 y subcriterios.

C2 (40%)				
PESOS	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4
LOCAL	24	39	9	29
%				
GLOBAL	9,6	15,6	3,6	11,6
%				

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

En la Tabla 21 se muestra que el subcriterio con mayor importancia o ponderación en el criterio C2. (económicos), es el correspondiente al costo de operación y mantenimiento con un valor de 39% de un total de 100%

Tabla 22 Matriz de comparación de criterio 3 y subcriterios.

C3 (31%)			
PESOS	C3.1	C3.2	C3.3
LOCAL	65	13	22
%			
GLOBAL	20,15	4,03	6,82
%			

En la Tabla 22 se muestra que el subcriterio con mayor importancia o ponderación en el criterio C3. (ambientales), es el correspondiente a la fracción renovable con un valor de 65% de un total de 100%

Tabla 23 Matriz de comparación de criterio 4 y subcriterios.

C4 (15%)				
PESOS	C4.1	C4.2	C4.3	C4.4
LOCAL	36	34	12	18
%				
GLOBAL	5,4	5,1	1,8	2,7
%				

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Y para la Tabla 22 se muestra que el subcriterio con mayor importancia o ponderación en el criterio C4. (técnicos), es el correspondiente a la eficiencia con un valor de 65% de un total de 100%

Para las tablas comprendidas entre las 24 hasta la 27 se logra visualizar el compendio de ponderaciones entre cada alternativa vs cada subcriterio, pero ahora con los factores de los pesos locales y globales para cada uno de los subcriterios, ponderaciones que más adelante nos permitirán realizar el cálculo de la mejor selección de fuente de energía renovable ver Tabla 29.

Tabla 24 Matriz de decisión final para el criterio 1.

	C1 (14%)				
	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5
Peso local	0,2	0,35	0,09	0,24	0,12
Peso	0,028	0,049	0,0126	0,0336	0,0168
global					
A1	0,34128016	0,27689709	0,2740019	0,31643269	0,25979155
A2	0,26428897	0,21096475	0,17043255	0,11901796	0,19173787
A3	0,09609312	0,13970683	0,11225884	0,11048195	0,12994408
A4	0,09773697	0,11988076	0,11218354	0,10851942	0,1380537
A5	0,07634842	0,09658874	0,09139943	0,11048195	0,1042857
A6	0,12425236	0,15596183	0,23972373	0,23506604	0,17618709

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Tabla 25 Matriz de decisión final para el criterio 2.

	C2 (40%)			
	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4
Peso local	0,24	0,39	0,09	0,29
Peso	0,096	0,156	0,036	0,116
global				
A1	0,26589814	0,05496679	0,06049416	0,04729572
A2	0,24701454	0,06102095	0,15157953	0,12943976
A3	0,11027578	0,111173231	0,31552875	0,28250111
A4	0,14590913	0,20418324	0,20053137	0,27430778
A5	0,04521281	0,34940696	0,08590461	0,17219761
A6	0,18568961	0,21868975	0,18596158	0,09425802

Tabla 26 Matriz de decisión final para el criterio 3.

	C3 (31%)		
	C3.1	C3.2	C3.3
Peso local	0,65	0,13	0,22
Peso	0,2015	0,0403	0,0682
global			
A1	0,17251226	0,0637428	0,30174537
A2	0,26342477	0,07358727	0,20125383

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

A3	0,13501334	0,31037045	0,1484536
A4	0,1347605	0,25609738	0,15318834
A5	0,18561093	0,11049767	0,06310921
A6	0,10867821	0,18570442	0,13224966

Tabla 27 Matriz de decisión final para el criterio 4.e

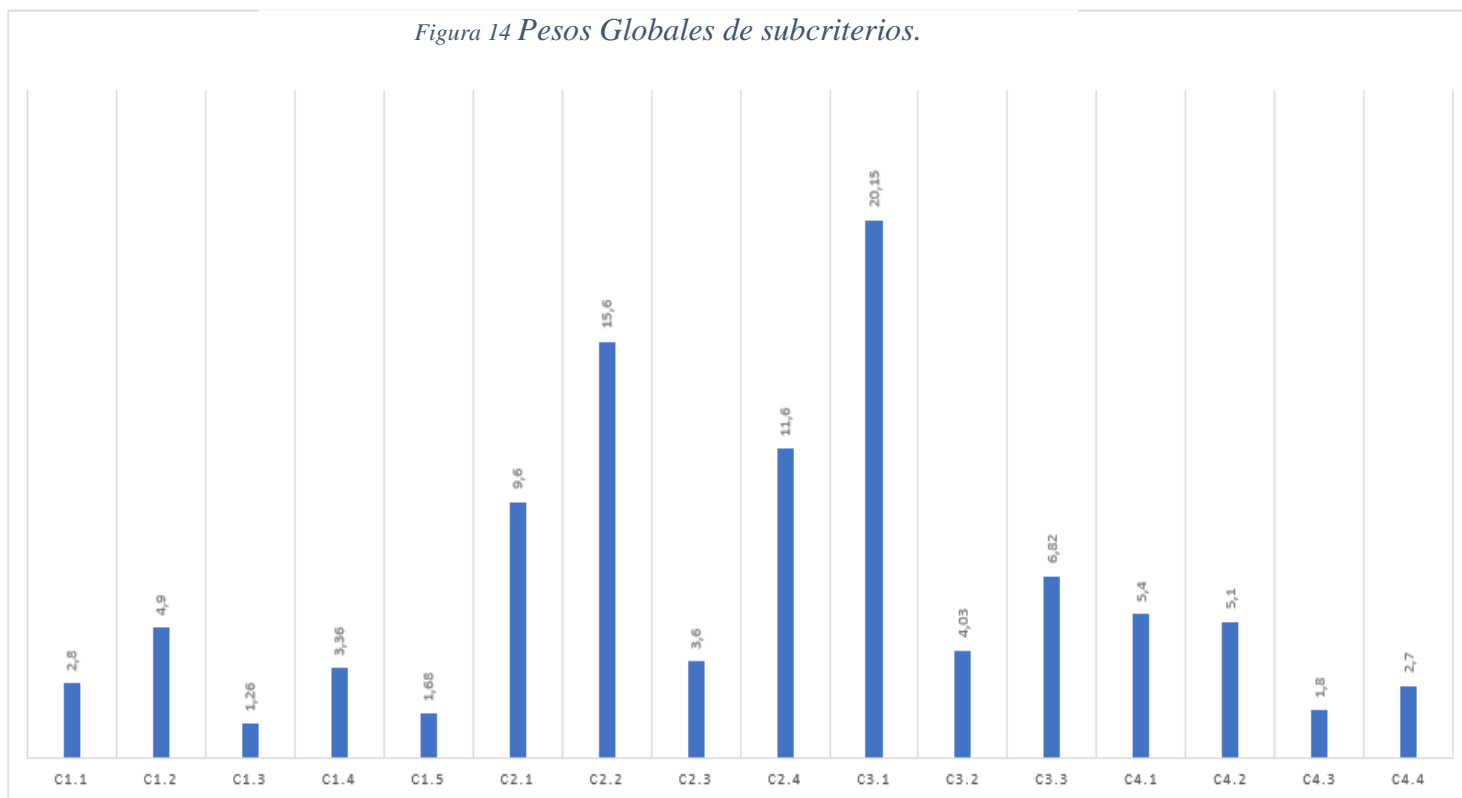
C4 (15%)				
	C4.1	C4.2	C4.3	C4.4
Peso local	0,36	0,34	0,12	0,18
Peso	0,054	0,051	0,018	0,027
global				
A1	0,4290604	0,45287186	0,32353098	0,3484389
A2	0,09891145	0,17974367	0,1378852	0,20982633
A3	0,17972048	0,14467231	0,13522958	0,1044756
A4	0,14321795	0,09282212	0,13766767	0,10743315
A5	0,05428729	0,0409151	0,06495761	0,06432166
A6	0,09480243	0,08897494	0,20072896	0,16550436

Resulta importante saber la ponderación porcentual de cada subcriterio evaluado, de esta forma se logra evidencia que dentro de los subcriterios seleccionados y expuestos a

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

juicio de los expertos existe una jerarquía, tal como se logra evidenciar en la Figura 14, donde el subcriterio C3.1 (fracción renovable) encabeza dicha jerarquía con un valor porcentual del 20.15%. seguido del subcriterio C2.2 (costo de operación y mantenimiento) ocupa la segunda posición dentro de esta jerarquía con un valor de 15.6% y en la tercera posición se tiene el subcriterio C2.4 (costo de generación de electricidad) con un valor 11.6%.

Figura 14 Pesos Globales de subcriterios.



Para el cálculo de los pesos globales de cada alternativa, se utilizará la siguiente ecuación producto de un matriz y un vector:

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1m} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2m} \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P'_1 \\ P'_2 \\ P'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{g1} \\ P_{g2} \\ P_{g3} \end{bmatrix} \quad (15)$$

La ecuación 15 representa la Ecuación de cálculo pesos globales por alternativas, donde la primera matriz simboliza:

	<i>Criterio 1</i>	<i>Criterio 2</i>	<i>Criterio m</i>
<i>Alternativa 1</i>	P_{11}	P_{12}	P_{1m}
<i>Alternativa 2</i>	P_{21}	P_{22}	P_{2m}
.....
<i>Alternativa n</i>	P_{n1}	P_{n2}	P_{nm}

Donde P_{ij} es la prioridad de la alternativa i con respecto al criterio j,

para $i = 1, 2, n$ y $j = 1, 2 \dots m$

Y el vector es:

	<i>Meta Global</i>
<i>Criterio 1</i>	P'_1
<i>Criterio 2</i>	P'_2
....
<i>Criterio m</i>	P'_m

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Donde m es el número de criterios y P'_i es la prioridad del criterio i con respecto a la meta global, para $i = 1, 2, \dots, m$

Calculo de pesos globales.

Es ahora cuando disponemos de todos los datos para poder hallar el peso global para cada alternativa, este peso se obtiene aplicando la siguiente formula:

$$P_{\text{global}}: \sum (P_{\text{local}} - \text{alternativa})(P_{\text{criterio}} - 2\text{nivel})(P_{\text{criterio}} - 1\text{nivel}) \quad (16)$$

La Tabla 23 muestra todos los datos que se requieren para poder encontrar la mejor alternativa a aplicar en la zona de estudio, utilizando la ecuación 16 determinaremos los pesos globales de cada una de alternativas:

- Alternativa 1: $(0.3412*0.028) + (0.2768*0.049) + (0.2740*0.0126) +$
 $(0.3164*0.033) + (0.2597*0.0168) + (0.2658*0.096) + (0.05496*0.156) +$
 $(0.0604*0.036) + (0.0472*0.116) + (0.1725*0.215) + (0.0637*0.0403) +$
 $(0.3017*0.0682) + (0.4290*0.054) + (0.4528*0.051) + (0.3235*0.018) +$
 $(0.3484*0.027) = \mathbf{0.2027}$
- Alternativa 2: $(0.2642*0.028) + (0.2109*0.049) + (0.1704*0.0126) +$
 $(0.1190*0.033) + (0.1917*0.0168) + (0.2470*0.096) + (0.0610*0.156) +$
 $(0.1515*0.036) + (0.1294*0.116) + (0.2634*0.215) + (0.0735*0.0403) +$
 $(0.2012*0.0682) + (0.0989*0.054) + (0.1797*0.051) + (0.1378*0.018) +$
 $(0.2098*0.027) = \mathbf{0.1732}$

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

➤ Alternativa 3: $(0.0960*0.028) + (0.1397*0.049) + (0.1122*0.0126) +$
 $(0.1104*0.033) + (0.1299*0.0168) + (0.1102*0.096) + (0.1117*0.156) +$
 $(0.3155*0.036) + (0.2825*0.116) + (0.1350*0.215) + (0.3103*0.0403) +$
 $(0.1484*0.0682) + (0.1797*0.054) + (0.1446*0.051) + (0.1352*0.018) +$
 $(0.1044*0.027) = \mathbf{0.1611}$

➤ Alternativa 4: $(0.0977*0.028) + (0.1198*0.049) + (0.1121*0.0126) +$
 $(0.1085*0.033) + (0.1380*0.0168) + (0.1459*0.096) + (0.2041*0.156) +$
 $(0.2005*0.036) + (0.2743*0.116) + (0.1347*0.215) + (0.2560*0.0403) +$
 $(0.1531*0.0682) + (0.1432*0.054) + (0.0928*0.051) + (0.1376*0.018) +$
 $(0.1074*0.027) = \mathbf{0.1665}$

➤ Alternativa 5: $(0.0763*0.028) + (0.0965*0.049) + (0.0913*0.0126) +$
 $(0.1104*0.033) + (0.1042*0.0168) + (0.0452*0.096) + (0.3490*0.156) +$
 $(0.0859*0.036) + (0.1856*0.116) + (0.1104*0.215) + (0.0631*0.0403) +$
 $(0.0542*0.0682) + (0.0409*0.054) + (0.0649*0.051) + (0.0643*0.018) +$
 $(0.1074*0.027) = \mathbf{0.1494}$

➤ Alternativa 6: $(0.1242*0.028) + (0.1559*0.049) + (0.2397*0.0126) +$
 $(0.2350*0.033) + (0.1761*0.0168) + (0.1856*0.096) + (0.2186*0.156) +$

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

$$\begin{aligned}
 & (0.1859*0.036) + (0.0942*0.116) + (0.1086*0.215) + (0.1857*0.0403) + \\
 & (0.1322*0.0682) + (0.0948*0.054) + (0.0889*0.051) + (0.2007*0.018) + \\
 & (0.1655*0.027) = \mathbf{0.1507}
 \end{aligned}$$

Finalmente, recopilado todos los datos y haber determinado el peso de las comparaciones entre las alternativas, en la Tabla 28 se sintetiza los resultados obtenidos.

Tabla 28 Puntuación final de cada alternativa.

Alternativas			
A1	Pv	0,2027442	20,27%
A2	Eolica	0,1732361	17,32%
A3	Digestor	0,1611677	16,12%
A4	Biogas	0,1666574	16,67%
A5	Incineracion	0,1494836	14,95%
A6	Colectores	0,150711	15,07%

Tabla 29 Matriz final de decisión.

	C1 (14%)					C2 (40%)				C3 (31%)			C4 (15%)			
	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C3.1	C3.2	C3.3	C4.1	C4.2	C4.3	C4.4
Peso local	0,2	0,35	0,09	0,24	0,12	0,24	0,39	0,09	0,29	0,65	0,13	0,22	0,36	0,34	0,12	0,18
Peso global	0,028	0,049	0,0126	0,0336	0,0168	0,096	0,156	0,036	0,116	0,2015	0,0403	0,0682	0,054	0,051	0,018	0,027
A1	0,3412802	0,2768971	0,2740019	0,3164327	0,2597916	0,2658981	0,0549668	0,0604942	0,0472957	0,1725123	0,0637428	0,3017454	0,4290604	0,4528719	0,323531	0,3484389
A2	0,264289	0,2109648	0,1704326	0,119018	0,1917379	0,2470145	0,061021	0,1515795	0,1294398	0,2634248	0,0735873	0,2012538	0,0989114	0,1797437	0,1378852	0,2098263
A3	0,0960931	0,1397068	0,1122588	0,1104819	0,1299441	0,1102758	0,1117323	0,3155287	0,2825011	0,1350133	0,3103704	0,1484536	0,1797205	0,1446723	0,1352296	0,1044756
A4	0,097737	0,1198808	0,1121835	0,1085194	0,1380537	0,1459091	0,2041832	0,2005314	0,2743078	0,1347605	0,2560974	0,1531883	0,143218	0,0928221	0,1376677	0,1074331
A5	0,0763484	0,0965887	0,0913994	0,1104819	0,1042857	0,0452128	0,349407	0,0859046	0,1721976	0,1856109	0,1104977	0,0631092	0,0542873	0,0409151	0,0649576	0,0643217
A6	0,1242524	0,1559618	0,2397237	0,235066	0,1761871	0,1856896	0,2186898	0,1859616	0,094258	0,1086782	0,1857044	0,1322497	0,0948024	0,0889749	0,200729	0,1655044

La comparación final en base a los resultados obtenidos establece que la alternativa con mayor peso es Solar fotovoltaica con un 20.27% , siendo la energía renovable que mejor se ajusta al requerimiento del problema propuesto, según la opinión de los expertos y la aplicación de la metodología FAHP.

Capítulo 4.

Resultados y Conclusiones

Resultados

Los combustibles fósiles y su uso excesivo traen consigo grandes problemas tanto ambientales como de escasez de recursos energéticos, no siendo estos los únicos, pero si un factor importante en emisiones de gases de efectos invernaderos a la capa de ozono, provocando que sea necesario utilizar energías limpias para la generación eléctrica, evitando así emisiones de gases de efecto invernadero. De tal manera que las energías renovables se pueden considerar como una fuente importante de energía, pensando en el desarrollo sostenible y la disminución de las emisiones de gases de efectos invernaderos.

En el presente estudio se analizaron seis energías renovables, (Solar Fotovoltaica (A1), Eólica (A2), Digestor de Biogás(A3), Biogás de Vertederos (A4), Incineración de residuos (A5) y Solar por Colectores solares (A6)), dichas alternativas fueron explicadas en el capítulo 2.3 y 2.4 que puedan suplir el suministro de energía en una zona urbana no interconectada, ubicado en la región Caribe de Colombia. En cuanto a la selección adecuada de entre estas seis energías, es completamente necesario recurrir a la aplicación de matrices de decisiones, realizando un análisis que abarque todos los problemas es decir los criterios y los subcriterios, para generar una solución concreta. En cuanto a los MCDM, resultan de gran utilidad para llevar a cabo complejos procesos de toma de decisiones y planificación energética, así mismo se seleccionaron 4 criterios y 16 subcriterios repartidos entre cada uno de los criterios, los criterios considerados como sus subcriterios se basaron en el estudio de diferentes artículos y/o publicaciones que se investigaron en diferentes base

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

de datos, obteniendo los siguientes criterios y subcriterios (explicados detalladamente en el capítulo 3.5):

Criterios: Sociales (C1), Económicos (C2), Ambientales (C3) y Técnicos (C4).

Subcriterios: Aceptación social (C1.1), Generación de trabajo (C1.2), Obstáculos en Zonas (C1.3), Disponibilidad de zona (C1.4) y Vandalismo y/o terrorismo (C1.5), Capital Inicial (C2.1), Costo de operación y mantenimiento (C2.2), Valor actual neto (C2.3), Costo de generación electricidad (C2.4), Facción renovable (C3.1), Huella de carbono (C3.2), Impacto ecosistema (C3.3), Eficiencia (C4.1), Fiabilidad (C4.2), Disponibilidad de la fuente (C4.3) y madures de la tecnología (C4.4).

Esta tesis de grado realiza una investigación y se fundamenta en el método de análisis jerárquico extendido con lógica difusa llamado (FAHP). Este método es una poderosa herramienta matemática y metodológica que descompone el problema en una estructura jerárquica con un objetivo a lograr, optando así por la mejor alternativa energética, a partir de juicios entregados por un grupo de expertos capaces de valorar un grupo finito de alternativas comparadas bajo criterios y subcriterios ya establecidos. Se planteo un modelo de encuesta que permitió valorar los juicios entregados por los expertos, obteniendo una matriz de comparación. El método propuesto por Chang (1996), simplifica problemas complejos en una jerarquía, por otra parte, Büyüközkan (2004) estableció pasos para la resolución del método de análisis extendido por Chang (1996) explicado en esta investigación capítulo 3.

Después de haber realizado el respectivo análisis, y como resultado de esta investigación, se establece que la mejor alternativa es la energía solar fotovoltaica, con un

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

porcentaje de 20.27%, seguida por la eólica con un porcentaje de 17.32%, en tercer lugar, es el biogás de vertederos con un porcentaje de 16.67%. Todo esto obtenido a partir de los juicios emitidos por los diferentes expertos, estableciendo que solar fotovoltaica es la solución más adecuada. En la Figura 15, se detalla de mejor manera los porcentajes obtenidos por cada energía.

Teniendo en cuenta los juicios de los expertos se tiene como mejor alternativa de energía renovable para la zona de estudio, la energía solar fotovoltaica. La selección de esta energía renovable está en la disponibilidad de recurso que se encuentra en la zona, esto se demuestra en el capítulo 1 de esta investigación donde se trata los factores climáticos predominantes.

En segundo lugar, está la energía eólica que cuenta con gran disponibilidad de recurso no siempre constante. La construcción de este tipo de proyecto traería consigo problemas en cuanto al impacto visual y ambiental y muy seguramente a la aceptación social. Por otra parte, se debe garantizar un flujo mínimo para que una pequeña planta eólica opere constantemente.

En tercer lugar, tenemos la energía de biogás muy apropiada a la zona por el tipo de actividad comercial que mayormente se ejecuta en la zona, además ayudaría en el aprovechamiento de todo el recurso de biomasa que en la actualidad se desperdicia en la zona y que es considerado como “basura” o sencillamente materia no aprovechable.

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

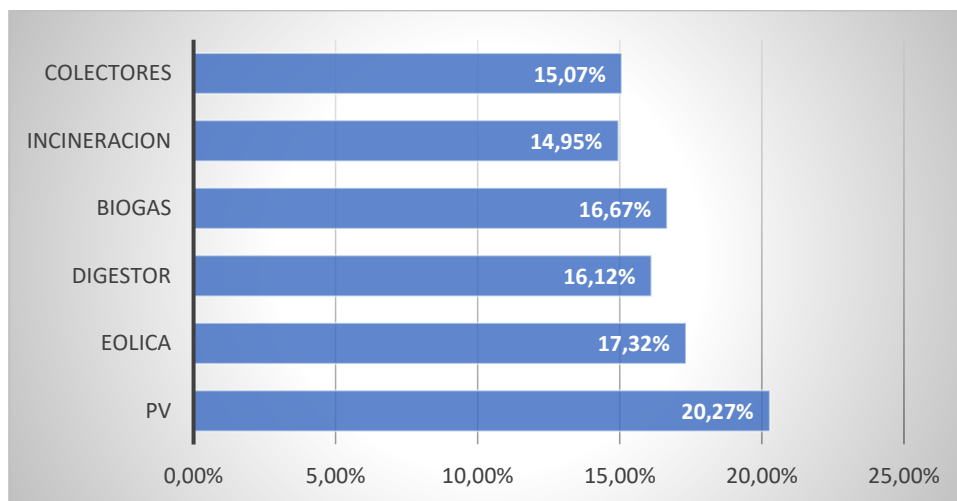


Figura 15 Jerarquización de alternativas de energías renovables.

En esta tesis de grado también se concluyeron las ponderaciones y jerarquización de la comparación de los criterios entre sí, arrojando los resultados que se observan en la Figura 16 donde el criterio económico con un 40% resulto ser el más importante a la hora de realizar una instalación de energía renovable, seguido por los ambientales con un 31%, en el tercer puesto están los criterios técnicos con un 15% y de ultimo los sociales con un 14%

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

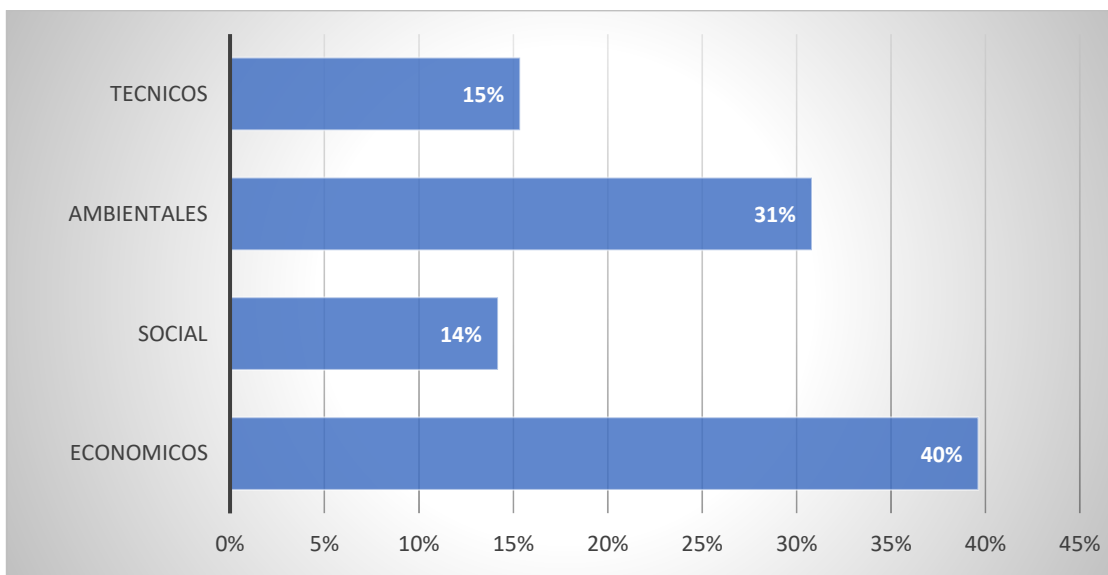


Figura 16 Jerarquización de criterios.

Así mismo se realizó la ponderación y jerarquización de todos los subcriterios teniendo presente los criterios donde están adscritos, en la Figura 17 se resumen todos los resultados obtenidos, no se debe caer en la equivocación de comparar un subcriterio económico con algún subcriterio social, los subcriterios se comparan solo con aquellos que hagan parte del mismo criterio, tal cual como se mostró en el capítulo 4 y se refleja en la Figura 18.

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

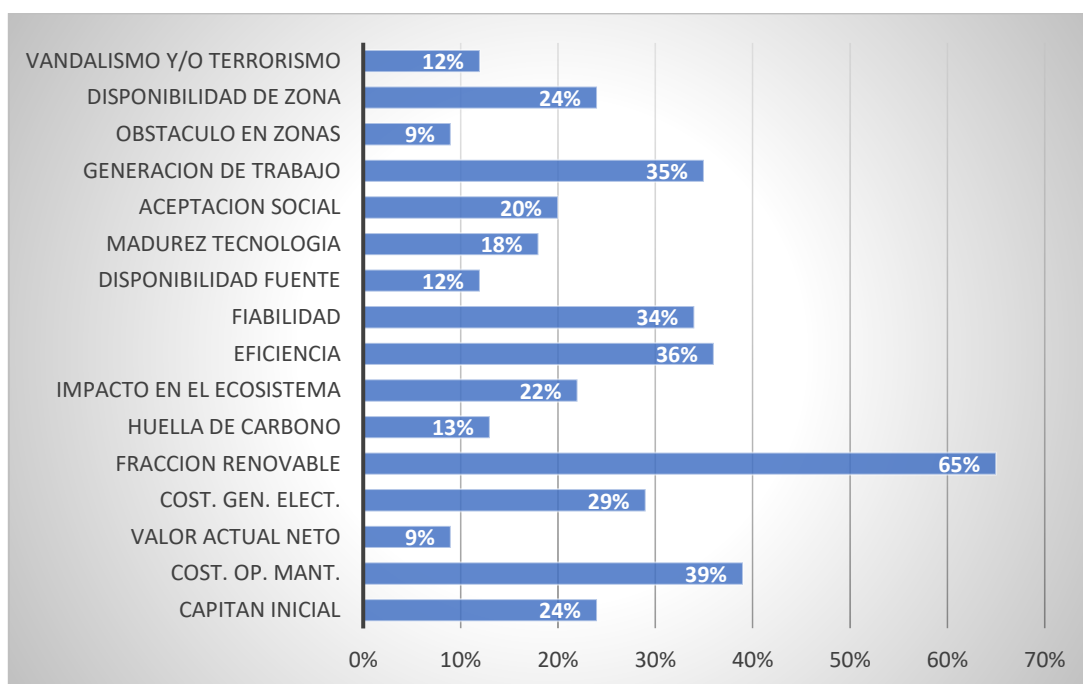


Figura 17 Resumen general de ponderación de subcriterios.

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

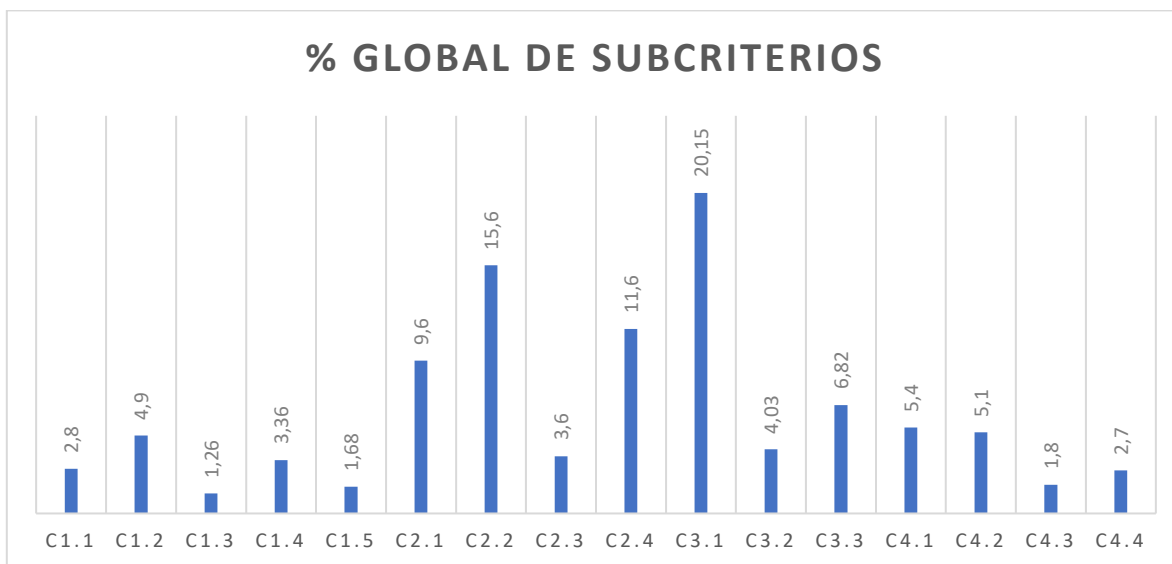


Figura 18 Ponderación porcentual de subcriterios

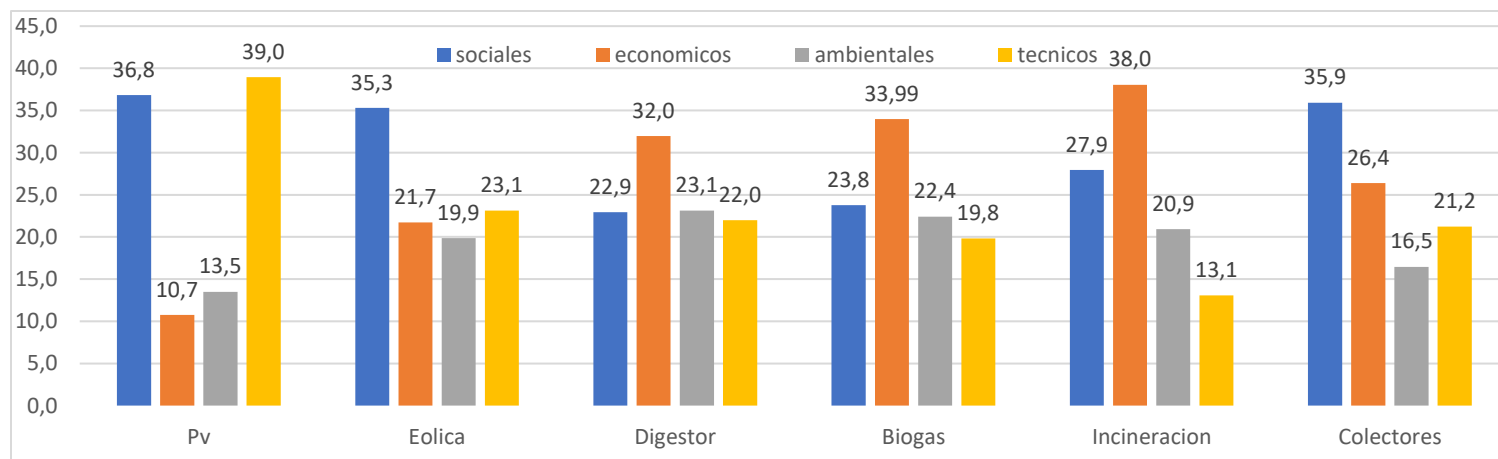


Figura 19 Ponderación de cada fuente energética vs los criterios evaluados

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

En la Figura 19 se visualiza la ponderación de cada fuente energética vs los criterios evaluados, se deduce que no existe un dominio homogéneo de algún criterio en todas las alternativas de energía, por ejemplo, para la alternativa solar fotovoltaica el criterio predominante con un 39% es el técnico, seguido por los criterios sociales con un 36.8% y culminando con los ambientales y económicos con valores porcentuales de 13.5 y 10.7 respectivamente. Caso contrario ocurre con la alternativa energética digestor de biogás, donde el criterio predominante son los económicos con un 32%, seguidos por los ambientales con un 23.1% y culminando con los sociales y técnicos con un 22.9 y 22% respectivamente. El ejemplo anterior nos confirma la variabilidad de la importancia de los criterios frente a cada una de las distintas fuentes de energía seleccionadas, no existiendo una tendencia al dominio general de algún criterio frente a cada una de las fuentes de energía.

Conclusiones

El hecho de utilizar los métodos de decisión multicriterio, con el objetivo de buscar la correcta elección entre varias opciones, se convierte en una poderosa herramienta en estos tiempos de grandes ejecuciones de proyectos y no solo a nivel de las energías renovables, si no a modo general. Para toda pequeña o gran empresa, sea pública o privada, hoy más que nunca está sometida a tomar decisiones en sus diversos campos: infraestructura, económico, personal, etc. El uso en concreto de un MCDM se da debido a la complejidad que presenta un conjunto de alternativas al ser evaluadas con respecto a un conjunto de criterios y estos a su vez subcriterios.

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Muchos son los campos de aplicación de los MCDM, para esta investigación fueron enfocado al campo de las energías renovables. Poco a poco a lo largo del tiempo ha ido incrementando la importancia que se les está dando a las energías renovables debido a las ventajas cuando estas son aplicadas en pro de una gran cantidad de población o industria. Una adecuada elección de una energía renovable depende de múltiples factores que impedirán o permitirán el correcto desarrollo de esta, debido que la finalidad es obtener grandes beneficios y no pérdidas. Una mala decisión al elegir una energía renovable que utilice recursos disponibles en una zona de aplicación traería consigo grandes pérdidas en tiempo y dinero. La metodología descrita en esta tesis por tanto ayudaría a tomar decisiones que podrían converger en políticas públicas tendientes a aprovechar los recursos energéticos que se dispondrían en una zona de estudio y posterior aplicación.

La metodología seleccionada en este estudio fue AHP con aplicación de lógica difusa, mejor conocido como FAHP. FAHP aporta el proceso de análisis jerárquico, mientras que la lógica difusa modela la vaguedad o falta de claridad de los expertos para con los criterios y subcriterios a evaluar, es decir FAHP elimina o mitiga la subjetividad que cada experto pueda tener a la hora de dar su respuesta. Es importante destacar que la teoría de conjuntos difusos abarca un acumulado de datos muy bien organizado de elementos básicos.

Los sistemas basados en números difusos crean una gran herramienta tanto para el modelado lingüístico como el numérico. Esto conduce a que grandes y extensos serán los cálculos requeridos para llevar a cabo dicho método, generando gran dificultad, si no se contara con softwares que realizan infinidad de cálculos matemáticos.

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Como consecuencia de todo el proceso realizado en esta investigación, se considera que la energía renovable más adecuada mas no la única para aplicar en la zona de estudio de la región caribe colombiana, es solar fotovoltaica con una calificación de 20.27%, seguido por la eólica con un 17.32%, en tercer puesto está la energía por Biogás con un 16.67%, en cuarto lugar la energía producida por Digestor con un 16.12%, en un quinto lugar tenemos la energía obtenida por colectores solares con un 15.07% y en un sexto puesto se encuentra la energía obtenida por Incineración de residuo con un 14.95%. Resulta muy importante ver que a simple vista la variación de entre una energía renovable con otra es de milésimas, demostrando así lo complejo que resulta elegir con un análisis simple. El resultado obtenido en la presente investigación sirve para validar o reforzar, estudios realizados por el gobierno colombiano para invertir en el mejoramiento de calidad de vida de los habitantes de la zona en mención, que proponen resultados similares, aun cuando muy seguramente utilizan otras técnicas de análisis.

En el año 2017 el gobierno de entonces se propuso la inversión de \$4.620.600.000 en instalación de 197.600 watts de energía eléctrica con energía solar fotovoltaica, para suplir la carga de aproximadamente 190 hogares, este proyecto cuenta con un radicado ante la IPSE (instituto de planificación y promoción de soluciones energéticas para las zonas no interconectadas) el cual es 20171330037692 20171330043622.

En definitiva, esto apoya a que el método cumplió con su cometido y entregó los resultados veraces, necesarios para una correcta toma de decisiones.

Si bien para esta investigación se usó FAHP, esto no quiere decir que los demás MCDM sean ineficientes o menos importantes, como se explicó en el sustento teórico de

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

estas tesis, diferentes fueron las razones por las cuales usar el método FAHP. Desde un punto de vista general, el camino no está limitado, dicho de otra forma, esta misma investigación se podría llevar a cabo combinando con otro MCDM.

Recomendaciones

En toda investigación siempre hay cavidad para unas futuras recomendaciones que permitirán la mejora del proceso y por ende los resultados que se obtengan. Siendo consciente que se realizaron encuestas a un grupo de expertos, se recomienda utilizar un modelo de encuesta en línea con licenciamiento, que sea óptimo para almacenar los datos y puedan ser accesible en todo momento, de este modo para cuando se realice el cálculo del método los datos sean más sencillos de utilizar y no exista inconvenientes al obtener los vectores prioridad.

Una segunda recomendación sería, sabiendo que el método FAHP es considerado un método para la ayuda de toma de decisión de múltiples criterios o subcriterios, de esta manera la subjetividad de los juicios entregados por los expertos puede disminuir al aplicar lógica difusa. Además, la aplicación de lógica difusa puede ser extendida a otro MCDM y en combinación con esta investigación se podría obtener mejores resultados.

Otra recomendación es que debido al extenso tiempo que se emplea en desarrollar todo el proceso matemático del método aplicado FAHP, se plantea como sugerencia el uso del Software MatLab, ya que se podría trabajar con cualquier tipo de matriz y se ejecutaría inmediatamente, por ende, se podría realizar una programación de acuerdo con lo requerido. Además, MatLab como programa cuenta con una herramienta nativa en SimuLink llamada “Fuzzy Logic Controller”, la cual podría ayudar en gran manera.

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Una última recomendación para futuras investigaciones sería emplear este proceso analítico jerárquico con lógica difusa, pero ahora enfocado en la solución de energía eléctrica en una población no interconectada o con pésimo servicio eléctrico, utilizando como fuente de energía la combinación de sistemas renovables con no renovables y de las múltiples opciones que se tengan tomar la mejor decisión según la evaluación de expertos y los resultados que se obtengan de la metodología.

Referencias

AFGAN, N. H., & CARVALHO, M. G. *Sustainability assessment of a hybrid energy system. Energy Policy*, 36(8), 2903-2910. doi: 10.1016/j.enpol.2008.03.040 2008

- **ALIZADEH, B., & JADID, S.** *Reliability constrained coordination of generation and transmission expansion planning in power systems using mixed integer programming. IET Generation, Transmission & Distribution*, 5(9), 948. 2011 doi:10.1049/iet-gtd.2011.012.
- **Al-Masri, H. M. K., & Ehsani, M.** (2016). *Impact of Wind Turbine Modeling on a Renewable Energy System. In 2016 North American Power Symposium (NAPS)* (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/NAPS.2016.7747870>
- **AMELI, A., MEMBER, S., FARROKHIFARD, M., & MEMBER, S.** *Profit-Based DG Planning Considering Environmental and Operational Issues: A Multiobjective Approach*, 2015 1–12.
- **ANTUNES, C. H., MARTINS, A. G., & BRITO, I. S.** *A multiple objective mixed integer linear programming model for power generation expansion planning. Energy*, 29(4), 2004 613-627. doi: 10.1016/j.energy.2003.10.012
- **BAÑOS, R., MANZANO-AGUGLIARO, F., MONTOYA, F. G., Gil, C., ALCAYDE, a., & GÓMEZ, J.** *Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 1753-1766. doi: 10.1016/j.rser.2010.12.008 2011
- **BASTIDAS BARRANCO, Marlon José.** *Análisis multiobjetivo para la optimización en sistemas de generación de energía Tesis Doctoral. Programa de Ingenierías.*

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

Área: Sistemas Energéticos. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Medellín. 2010

- BHATTACHARYYA, S. C. *Review of alternative methodologies for analysing off-grid electricity supply. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 677-694. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.rser.2011.08.033. 2012
- Bhattacharyya, S. C. (2012). Review of alternative methodologies for analysing off-grid electricity supply. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 677–694. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.033>
- BLOOM, J. A. *Solving an Electricity Generating Capacity Expansion Planning Problem by Generalized Benders' Decomposition. Operations Research*, 31(1), 84-100. 1982
- Buckley, J.J., Yan, A. (2000). *Fuzzy functional analysis (I): Basic concepts, Fuzzy Sets and Systems*, 115(3), 393-402, [http://dx.doi.org/10.1016/S0165-0114\(98\)00161-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0165-0114(98)00161-4).
- CADENA, Angela et al. —Programa para soportar la toma de decisiones de soluciones energéticas a ZNI con un enfoque de optimización en la maximización del beneficio para resolver el problema del suministro de electricidad con mínimo costo, en: *VI Seminario Internacional sobre Análisis y Mercados Energéticos, Medellín, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín* Universidad de Los Andes. 2005

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

- *CHERNI JA, DYNER I, HENAO F, Jaramillo P, Smith R, Font RO. Energy supply for sustainable rural livelihoods: a multi-criteria decision support system. Energy Policy 2007;35(3):1493–504.*
- *CLÍMACO JOAO et al., A multiple objective linear programming model for power generation expansion. International Journal Of Energy, 19(March 1994), 1995 419-432.*
- *comparación de alternativas mediante un Sistema de Ayuda a la Decisión (S.A.D.) “Soft Computing.” Departamento de Electrónica, Tecnología de Computadoras y proyectos. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA.*
- *CONSEJO DE LIDERAZGO DE LA RED DE SOLUCIONES PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE Una Agenda de Acción para el Desarrollo Sostenible. Informe para el secretario general de las Naciones Unidas. Sustainable Development Solutions Network. A global initiative for the United Nations.www.unsdsn.org. 2013 Pág ix.*
- *CONSEJO DE LIDERAZGO DE LA RED DE SOLUCIONES PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE Op. Cit Pág. 22.*
- *Corona Zuñiga, I. (2007). Biodigestores. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.*
- *Corona Zuñiga, I. (2007). Biodigestores. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.*
- *Corporación Autónoma Regional del Atlántico. (2019).*
<http://www.crautonomia.gov.co/documentos/Planes/2016/PAC%202016-2016.pdf>.

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

- Cherni, J. A., Dyner, I., Henao, F., Jaramillo, P., Smith, R., & Font, R. O. (2007). Energy supply for sustainable rural livelihoods. A multi-criteria decision-support system. *Energy Policy*, 35(3), 1493–1504.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.03.026>
- Deveci, K., & Güler, Ö. (2020). A CMOPSO based multi-objective optimization of renewable energy planning: Case of Turkey. *Renewable Energy*, 155(5686), 578–590. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.033>
- DOUKAS, H. C., ANDREAS, B. M., & PSARRAS, J. E. *Multi-criteria decision aid for the formulation of sustainable technological energy priorities using linguistic variables. European Journal of Operational Research*, 182(2), 844-855. doi: 10.1016/j.ejor.2006.08.037 2007
- EHRGOTT, M. *A discussion of scalarization techniques for multiple objective integer programming. Annals of Operations Research*, 147(1), 2006 343-360. doi:10.1007/s10479-0060074-z.
- Elheraldo.Co, R. (2016, 13 marzo). El mapa del deficiente servicio de energía en la Costa. EL HERALDO. <https://www.elheraldo.co/local/el-mapa-del-deficiente-servicio-de-energia-en-la-costa-248430>
- Encarnación, Yamir (2013). *LA LÓGICA DIFUSA APLICADA AL SECTOR MANUFACTURERO. Ciencia y Sociedad*, 38(4),793-814. [fecha de Consulta 27 de Agosto de 2020]. ISSN: 0378-7680. Disponible en:
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=870/87029731007>

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

- Eras, A. (2012). *Estudio Energético del Sistema Eléctrico en Ecuador. Impulso a la Energía Solar Fotovoltaica*. Retrieved from <http://www.uti.edu.ec/documents/investigacion/volumen3/04Franco-2014.pdf>
- EROGLU, Hasan and Aydin Musa Optimization of electrical power transmission lines' routing using AHP, fuzzy AHP, and GIS, 2015 1418–1430.
<http://doi.org/10.3906/elk-1211-59>
- EVE. (2001). *Tecnologías Avanzadas de Generación Eléctrica*. Bilbo.
- EVE. (2001). *Tecnologías Avanzadas de Generación Eléctrica*. Bilbo.
- FRANCO, Carlos; DYNER, Isaac e HOYOS, Santiago Contribución de la energía al desarrollo de comunidades aisladas no interconectadas: Un caso de aplicación de la dinámica de sistemas y los medios de vida sostenibles en el Suroccidente Colombiano. *Dyna -Revista. Facultad. Nacional de. Minas [online]*, vol.75, n.154, 2008 pp. 199-214. ISSN 0012-7353.
- Fryer, A., González Diaz, C. Y., Gato Clavell, T., Girón Guillot, R. L., Pires Araújo, C. L., Rimaitytė, I., ... Martuzevicius, D. (2015). *Determinación del Potencial energético de los Residuos Sólidos Urbanos en tres municipios de la provincia de Luanda. Angola. Determination of the Energy Potential of the Urban Solid Residuals in Three Municipalities of the County of Luanda.* Angola., 35(5), 989–998.
- García-Cascales, M. D. S. D. S., & Jiménez, M. T. L. (2009). *Métodos para la*
- GONZALES Guillermo CADENA Angela. et al, *Desarrollo de un programa para la ayuda en la toma decisiones para la implementación de soluciones energéticas en las zonas no interconectadas*. 2005

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

- HAGLER, BAILLY Y AENE CONSULTORÍA Documentos ANC-375-10, 13, 16, 17, 20, 21, 22, 23, 24, 27, 28 y 29, en: *Establecimiento de un plan estructural, institucional y financiero, que permita el abastecimiento energético de las zonas no interconectadas, con participación de las comunidades y el sector privado. Santafé de Bogotá. 2001.*
- HENAO, Felipe et al. *Modelo de toma de decisiones multiobjetivos en energización de ZNI, como herramienta para el alcance de MVS. Tesis de Maestría. Escuela de Sistemas. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 2005*
- HOYOS, SANTIAGO *Simulación para la evaluación de políticas en la energización de una ZNI del suroccidente colombiano utilizando DS y MVS. Tesis de maestría en ingeniería de sistemas, Medellín, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 2007*
- INSTITUTO DE PLANEACIÓN Y PROMOCIÓN DE SOLUCIONES *ENERGÉTICAS PARA LAS ZONAS NO INTERCONECTADAS Manual metodológico para la formulación, evaluación y priorización de proyectos de soluciones energéticas para las ZNI. Santafé de Bogotá. 2001.*
- Jamal, T., Urmee, T., & Shafiullah, G. M. (2020). Planning of off-grid power supply systems in remote areas using multi-criteria decision analysis. *Energy*, 201. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117580>
- JEBARAJ S, INIYAN S. *A review of energy models. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2006; 10(4):281–31*
- John, A., Yang, Z., Riahi, R., & Wang, J. (2014). Application of a collaborative modelling and strategic fuzzy decision support system for selecting appropriate

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

resilience strategies for seaport operations. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 1(3), 159–179. [https://doi.org/10.1016/S2095-7564\(15\)30101-X](https://doi.org/10.1016/S2095-7564(15)30101-X)

- Kabak, M., Köse, E., Kirilmaz, O., & Burmaoğlu, S. (2014). A fuzzy multi-criteria decision making approach to assess building energy performance. *Energy and Buildings*, 72, 382–389. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.059>
- KARNI, R., FEIGIN, P., BREINER, A. *Multicriterion issues in energy policy making. European Journal of Operational Research* 56, 1992 30–40.
- KAZEMI, A., DEHGHAN, S., & AMJADY, N. *Multi-objective robust transmission expansion planning using information-gap decision theory and augmented ε -constraint method. IET Generation, Transmission & Distribution*, 8(5), 828–840. 2014 <http://doi.org/10.1049/ietgtd.2013.0427>
- KIM, Y.-CHANG. *Multicriteria Generation-Expansion Planning with Global Environmental Considerations. Engineering*, 40(2), 1993 154-161
- Lalvay, E., & Vidal, J. (2013). *Estudio técnico – económico de una planta de generación eléctrica a base de biogás. Universidad de Cuenca. Retrieved from <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/21897/Capitulo2.pdf>*
- LINARES LLAMAS, P. *Integración de criterios medioambientales en procesos de decisión: una aproximación multicriterio a la planificación integrada de recursos eléctricos. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes España. 1999*
- Mahendran, P., Moorthy, M. B. K., & Saravanan, S. (2014). A fuzzy AHP

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

approach for selection of measuring instrument for engineering college selection.

Applied Mathematical Sciences, 8(44), 2149–2161.

<https://doi.org/10.12988/ams.2014.44232>

- MARQUES, J. E., Teixeira, J., Chamine, H. I., Carvalho, M. R., Rocha, F., Fonseca, P. E., & Pe, A. A comprehensive analysis of groundwater resources using GIS and multicriteria tools (Caldas da Cavaca, Central Portugal): environmental issues, 2015 2699–2715. <http://doi.org/10.1007/s12665-014-3602-1>
- MEZA, J. L. C., YILDIRIM, M. B., & MASUD, A. S. M. *Op. Cit.*
- Morales Flores, F. J. (2011). *Aplicación de métodos de toma de decisiones multi-atributo en la definición de prioridades en la gestión de infraestructuras en San Luis Potosí, México*. Universidad Politécnica de Madrid.
- MORANTE, F., ZILLES, R., ESPINOZA, R. y HORN M. (2003), *Consumo de energía eléctrica en sistemas: fotovoltaicos domiciliarios de las comunidades de Los Uros, Taquile, Amantaní y Huancho Lima de la región de Puno, Perú, Sometido a la revista Energías Renovables y Medio Ambiente, ASADES, Argentina.*
- NARANJO, L & BOTERO, S. *Informe Marco Legal. En Proyecto COLCIENCIAS. Plataforma para el soporte a la evaluación de políticas y a la toma de decisiones en energización de zonas no interconectadas en Colombia. En Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Mayo 2005*
- OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, *Wien Automatic System Planning Package (WASP): An Electric Expansion Utility Optimal Generation Expansion Planning Computer Code, Rep. ORNL4925 1974.*

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

- *ORGANIZACIÓN LATINOAMERICANA DE ENERGÍA (OLADE), en su programa de energía sostenible desarrolla un proyecto conjuntamente con la Universidad de Calgary y el gobierno de Canadá para electrificación rural en Colombia (2006) —diseño y operación de los sistemas energéticos para zonas asiladas, la puesta en marcha de esquemas de sostenibilidad, capital semilla para replicar proyectos piloto*
- Osorio Gómez, J. C. (2011). Fuzzy QFD for multicriteria decision making - Application example. *Prospectiva*, 9(2), 22–29.
- PANPAN, J., JUN, Z., & CHUANCHUAN, C. Multi-objective optimization for renewable energy distributed generation based on fuzzy satisfaction. 2013 5th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA), (2), 1–4. 2013 <http://doi.org/10.1109/PESA.2013.6828223>.
- Peláez, M. R., García, M., Barriga, A., Martí, J., Montero, A., Mayer, F., & García, J. (2015). Estado de uso de la biomasa lignocelulósica para la producción de bioenergía, biocombustibles y bioproductos en Ecuador. In M. Peláez & J. Espinoza (Eds.), *Energías Renovables en el Ecuador: Situación actual, Tendencias y Perspectivas*
- PÉREZ, Edison” Energización rural en ecosistemas estratégicos de Colombia”, Medellín, I Simposio Internacional Energía y frontera tecnológica en el sector rural. Centro de Convenciones Quirama. 2005

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

- POHEKAR, S. D., & RAMACHANDRAN, M. *Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(4), 365–381. doi: 10.1016/j.rser.2003.12.007. 200
- POLATIDIS H, Haralambopolous DA. *Renewable energy sources planning and design: a multicriteria approach. In: van den Bergh J, Bruinsma FR, editors. Managing the transition to renewable energy: theory and practice from local regional and macro perspectives. Cheltenham, U.K.: Edward Elgar; 2008 [chapter 11]*
- QUIJANO HURTADO, RICARDO *Diseño e implementación de una plataforma integrada de modelación para la planificación energética sostenible -Modergis – —estudio de caso Colombia" Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. 2012*
- Ripa, M., Fiorentino, G., Giani, H., Clausen, A., & Ulgiati, S. (2017). *Refuse recovered biomass fuel from municipal solid waste. A life cycle assessment. Applied Energy*, 186, 211–225. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.058>
- Robles-Algarín, C. A., Taborda-Giraldo, J. A., & Ospino-Castro, A. J. (2018). *Procedimiento para la Selección de Criterios en la Planificación Energética de Zonas Rurales Colombianas. Información Tecnológica*, 29(3), 71–80. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000300071>
- Romero Rodríguez, L., Duminil, E., Sánchez Ramos, J., & Eicker, U. (2017). *Assessment of the photovoltaic potential at urban level based on 3D city models: A case study and new methodological approach. Solar Energy*, 146, 264–275.

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.043>

- SAATY TL. *The analytic hierarchy process*. New York, NY, USA: McGraw-Hill. 1980
- Şengül, Ü., Eren, M., Eslamian Shiraz, S., Gezder, V., & Sengül, A. B. (2015). Fuzzy TOPSIS method for ranking renewable energy supply systems in Turkey. *Renewable Energy*, 75, 617–625. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.045>
- SERAFIM OPRICOVIC & TZENG, 2007
- SMITH, R Y J. MESA A rural electrification expansion model. *International Transactions in Operacional Research*. Vol. 3, 1996 pp. 319-325.
- SMITH, R. Y A. PULGARÍN Optimización multiobjetivo con algoritmos genéticos: desarrollo de un modelo para energización rural. Chile, XI Congreso Latino-iberoamericano de investigación de operaciones. 2000
- Studi, P., Teknik, M., Pascasarjana, P., Atma, U., & Yogyakarta, J. (2013). *Fuzzy Analytic Hierarchy Process*.
- Structuralia. (2016). *La planta de energía mareomotriz Rance Tidal*. Retrieved January 10, 2018, from <https://www.structuralia.com/mx/blog/33-energia/10002006-la-planta-de-energia-mareomotriz-rance-tidal>
- TEKINER, H., COIT, D. W., & FELDER, F. a. Multi-period multi-objective electricity generation expansion planning problem with Monte-Carlo simulation. *Electric Power Systems Research*, 80(12), 1394-1405. Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.epsr.2010.05.007 2010

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

- *TEKINER, H., COIT, D. W., & FELDER, F. a. Multi-period multi-objective electricity generation expansion planning problem with Monte-Carlo simulation. Electric Power Systems Research, 80(12), 1394-1405. Elsevier B.V. 2010 doi: 10.1016/j.epsr.2010.05.007*
- *THEODOROU, S., FLORIDES, G., & TASSOU, S. Op. Cit.*
- *THEODOROU, S., FLORIDES, G., & TASSOU, S. The use of multiple criteria decision making methodologies for the promotion of RES through funding schemes in Cyprus, A review. Energy Policy, 38(12), 7783–7792. doi: 10.1016/j.enpol.2010.08.038. Theodorou investiga el uso de MCDM métodos y su implementación en la isla de Chipre. 2010*
- *TOBÓN OROZCO, David et al. Optimización de herramientas multiobjetivo para la toma de decisiones de inversión en sistemas aislados sostenibles de energía. Universidad de Antioquia, ISA, Colciencias. 2010.*
- *Torres, M. D. (2008). Energías renovables y eficiencia energética. Retrieved from <http://www.fomentosansebastian.org/es/sectores-emergentes/energias-renovables-y-eficiencia-energetica>*
- *VEGA SALAS, P. (2003), Estudio Social del “Proyecto de Electrificación Rural con Energía Fotovoltaica en La Isla: De Taquile – Puno IV Simposio peruano de Energía Solar, Cuzco*
- *WANG, Haichao., Jiao Wenling., Lahdelma Risto., Zhu Chuanzhi & Zou Pinghua Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis for Evaluation of Combined Heat and Power Units, 2015 59–78. <http://doi.org/10.3390/en8010059>.*

PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA DIFUSA

- WANG, J.-J., JING, Y.-Y., ZHANG, C.-F., & ZHAO, J.-H. *Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2009 2263-2278. doi: 10.1016/j.rser.2009.06.021
- WRIGHT JA, LOOSEMORE HA, FERMANI R. *Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm. Energy and Buildings* 2002; 34:959–72.
- Zapata, J. A. (2011). *Metodología para la implementación de tecnologías de la información y las comunicaciones TIC's para soportar una estrategia de cadena de suministro esbelta*. Universidad Nacional de Colombia.
- Zapf, M. (2011). *Ciudades verdes: abiertas a la vida*. Retrieved from www.mediaserver.hamburg.de
- Zhao, G., Guerrero, J. M., Jiang, K., & Chen, S. (2017). *Energy modelling towards low carbon development of Beijing in 2030. Energy*, 121, 107–113. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.019>